

**Untersuchungen zum Fangvermögen von Mittel- und Feinstaub
(PM10 und PM2.5) an ausgesuchten Pflanzenarten unter
Berücksichtigung der morphologischen Beschaffenheit der Blatt-
und Achsenoberflächen und der Einwirkung von Staubauflagen auf
die Lichtreaktion der Photosynthese**

Inaugural-Dissertation

zur

Erlangung des Doktorgrades

der Fakultät Biologie

an der

Universität Duisburg-Essen

Vorgelegt von

Sabine Flohr

aus Bergisch Gladbach

Datum der Abgabe : September 2010

Die der vorliegenden Arbeit zugrunde liegenden Experimente wurden am Institut für Angewandte Botanik der Universität Duisburg-Essen durchgeführt.

1. Gutachter: Prof. Dr. Hardy Pfan­z
2. Gutachter: Prof. Dr. Wilhelm Kuttler

Vorsitzende des Prüfungsausschusses: Prof. Dr. Angela Sandmann

Tag der mündlichen Prüfung: 26.01.2011

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Aktueller Stand der Forschung	1
1.1.1	Methoden zur quantitativen Bestimmung von Staub auf Oberflächen	1
1.1.2	Reduzierungsansätze und Filterwirkung von Pflanzen	3
1.1.3	Allgemeiner Einfluss von Staub auf pflanzliche Oberflächen	6
1.2	Partikel in der Atmosphäre	9
1.2.1	Definition, Vorkommen, Entstehung, Grenzwerte	9
1.2.2	Abscheidemechanismen	16
1.2.3	Gesundheitswirkung von Staub	21
2	Material und Methoden	23
2.1	Eingesetzte Stäube	23
2.1.1	Feinstaub - Geogener Staub	23
2.1.2	Mittelstaub - Biogener Staub	24
2.2	Auswahl und Aufbereitung der Pflanzen	25
2.3	Quantifizierung von Staubauflagerungen	27
2.3.1	Gravimetrische Bestimmung des Staubauftrages	27
2.3.1.1	Aufbereitung der Proben	27
2.3.2	Turbidimetrische Trübungsmessung	30
2.3.2.1	Funktionsprinzip des Spektrophotometers	30
2.3.2.2	Eichkurve	31
2.3.2.3	Aufbereitung der Proben	33
2.3.2.3.1	Blattorgane	33
2.3.2.3.2	Zweige/Äste	34
2.4	Chlorophyllfluoreszenzanalyse	35
2.4.1	Chlorophyllfluoreszenz	35
2.4.2	Funktionsprinzip und Messinstrumente	37
2.4.3	Wichtige Fluoreszenzparameter	37
2.4.3.1	Dunkeladaptierte Proben	38
2.4.3.2	Lichtadaptierte Proben	38

2.4.4	Versuchsaufbau.....	39
2.4.5	Vergleich Imaging-PAM / Teaching-PAM.....	40
2.5	Spektroradiometrische Messung der Transmission.....	42
2.5.1	Transmissionsmessung an Blattflächen.....	42
2.5.2	Transmissionsmessung von Staubschichten unterschiedlicher Mächtigkeit.....	43
2.6	Statistische Auswertung.....	44
2.7	Digitalmikroskopische Aufnahmen.....	44
3	Ergebnisse und Diskussion.....	45
3.1	Quantifizierung von Staubauflagerungen.....	45
3.1.1	Das maximale, flächenbezogene Staubfangvermögen von Assimilationsorganen - differenziert nach Pflanzenart, Pflanzenorgan und Staubfraktion.....	45
3.1.1.1	Das maximale, flächenbezogene Staubfangvermögen von Blättern - differenziert nach Pflanzenart und Staubfraktion.....	45
3.1.1.1.1	Mittelstaub - Biogener Staub.....	45
3.1.1.1.2	Feinstaub - Geogener Staub.....	56
3.1.1.1.3	Untersuchungen an Blattober- und -unterseiten.....	76
3.1.1.1.4	Staubfangvermögen in Abhängigkeit des Alters der Behaarung.....	83
3.1.1.1.5	Taxonomische Eingliederung.....	86
3.1.1.1.6	Pflanzentypen.....	89
3.1.1.2	Das maximale, flächenbezogene Staubfangvermögen von Zweigen - differenziert nach Jahrgängen.....	93
3.1.1.2.1	Diesjährige Zweige.....	93
3.1.1.2.2	Mehrjährige Zweige.....	98
3.2	Wirkung von Staubauflagerungen auf Blättern auf den Lichtgenuss - differenziert nach Mittel- und Feinstaub.....	102
3.2.1	Transmission.....	102
3.2.1.1	Transmissionsmessungen von Staubschichten unterschiedlicher Mächtigkeit	104
3.2.1.2	Änderungen der Lichttransmission nach maximal anhaftendem Mittel- und Feinstaubauftrag.....	106
3.3	Wirkung von Staubauflagerungen auf Blättern auf die Photosynthese - differenziert nach Mittel- und Feinstaub.....	112
3.3.1	Absorption.....	112

3.3.2	Elektronentransportraten.....	120
3.3.2.1	Elektronentransportraten von Lichtkurven.....	121
3.3.2.2	Elektronentransportraten bei 366 PAR.....	128
3.4	Schlussfolgerungen und Ausblick.....	133
3.4.1	Modell zum optimalen Einsatz von Straßenbegleitgrün.....	140
3.4.2	Eigene Hochrechnungen zur Gesamtfilterleistung.....	146
4	Zusammenfassung.....	147
5	Literaturverzeichnis.....	149
6	Anhang.....	164
6.1	Abkürzungsverzeichnis.....	164
6.2	Abbildungsverzeichnis.....	166
6.3	Tabellenverzeichnis.....	172
6.4	Danksagung.....	175
6.5	Lebenslauf.....	176

1 Einleitung

1.1 Aktueller Stand der Forschung

Über das Staubbinderungspotential von Pflanzen wurden diverse Untersuchungen durchgeführt (u.a. BERNATZKY 1973, HELBING 1973, SPERBER 1975). Dabei wurde mit verschiedensten Methoden unter anderem der Staubauftrag auf Blättern an viel befahrenen Straßen mit Reinluftflächen verglichen und wichtige Einblicke über die Verteilung des Staubes gewonnen. Erste grundlegende Ergebnisse zeigten, dass begrünte Straßen und Grünanlagen einen bis zu sechsfach niedrigeren Staubgehalt aufwiesen als unbegrünte Straßen (BERNATZKY 1973).

Zeigt man sich in Deutschland Begrünungsmaßnahmen gegenüber eher zurückhaltend, werden in den Niederlanden erfolgreich über verschiedene Pilotprojekte, beispielsweise die Schaffung eines „Grünen Gürtels“ um Amsterdam, Begrünungen umgesetzt. Erste Erfolge in der Reduktion des Staubes aus der Atmosphäre sind erzielt worden (VAN BAAREN et al. 2007). Es existiert ein Katalog von Begrünungsmaßnahmen, der gezielt z.B. Lösungsansätze für viel befahrene Straßen aufzählt (KUYPERS & DE VRIES 2007).

Pflanzen können lediglich als Zwischenspeicher für Feinstaub und allgemein Stäube dienen, da Regenerscheinungen einen Teil abwaschen. Wind und Böen können Staub abblasen und auch durch Reibung und Berührung mit anderen Pflanzenorganen kann Staub entfernt werden (DRÖSCHER 1990).

1.1.1 Methoden zur quantitativen Bestimmung von Staub auf Oberflächen

Es gibt eine Reihe verschiedener Methoden, um die Staubauflagerung auf Oberflächen zu bestimmen.

Blattabwaschverfahren, wie z.B. von MARQUES (1999) verwendet, bestimmen den reellen durch trockene Deposition angesammelten atmosphärischen Partikelbelag auf ausgewählten repräsentativen Rezeptoroberflächen. Der Belag wird mit einer Waschlösung abgespült, eingedampft und der Rückstand gravimetrisch bestimmt.

Ein ähnliches Verfahren basiert ebenso auf der gravimetrischen Bestimmung. Die gesammelten Blattproben werden mit Wasser abgespült, das Eluat durch Zellulose-Nitrat-Filter (0,45 µm Porenweite) gegeben und bei Raumtemperatur getrocknet und im Anschluss gewogen (BECKETT et al. 2000a).

Gravimetrisch Staubauflagerungen auf Pflanzenoberflächen mit Hilfe des Abwaschverfahrens zu bestimmen ist eine häufig verwendete Methode (DASCH 1986, FREER-SMITH et al. 1997, ULLRICH 1980). Neben den Vorteilen (sehr gute Durchführbarkeit) besteht das Problem, dass nicht alle Partikel rückstandslos von der Oberfläche entfernt und die Blattseiten nur schwierig getrennt voneinander untersucht werden können.

In dieser Arbeit wurde mit Hilfe der Gravimetrie über Frischgewichte unbestaubter und bestaubter Proben der Staubauftrag ermittelt. Dabei wurde durch gezieltes Bestauben von nur einer Blattseite die Bestimmung des Staubfangvermögens getrennt nach Blattober- und Blattunterseite möglich. In den feineren Kornfraktionen erwies sich die turbidimetrische Methode als geeignet, um über Trübungsmessungen den Staubauftrag zu quantifizieren.

In früheren Arbeiten wird auf die Verwendung eines Photometers zur Erfassung der Staubauflage hingewiesen (ULLRICH 1976). Hierbei wird jedoch nur die veränderte Abschwächung des Lichts durch ein Blatt mit und ohne Staub erfasst. Bei konstanter Lichtquelle und unter konstanten äußeren Bedingungen wird das Bild des Blattes auf eine Mattscheibe einer fotografischen Einrichtung geworfen und dort die ankommende Lichtmenge gemessen. Der verminderte Lichtdurchtritt in Bezug auf ein sauberes Blatt ist ein Maß für die Verschmutzung.

Eine weitere Methode Staub zu quantifizieren sind Diem'sche Haftfolien. Sie bestehen aus Aluminium (4x8,25cm) und werden mit Vaseline benetzt und gewogen. Über vorher/nachher Messung wird die Staubmenge [g/m²] gravimetrisch bestimmt. Die Methodik ist für Vergleichswerte gut geeignet, exakte Messungen sind aufgrund von Auswaschungen bei Regen nicht möglich. Die maximale Fangkapazität beträgt 30 g/m² (FLÜCKIGER et al. 1978).

Eine weitere Möglichkeit Staubauflagerungen zu quantifizieren bietet die Abklatschmethode. Entweder können Abklatschpräparate durch Auftragen einer Lösung die nach Verdampfen einen Film bildet, der zu einem mikroskopischen Präparat verarbeitet werden kann hergestellt, oder man erzeugt Abziehfilme, z.B. durch Auflegen eines Klebestreifens und anschließender Entfernung (KISSER & LEHNERT 1957). Zudem wird ein Stripping-Verfahren auf der Basis von Polyvinyl-Butyral-

Abziehlacken erfolgreich seit langem angewendet (RENTSCHLER 1982, THÖNNESSEN 2002, 2006).

Bisherige Modellrechnungen zur PM₁₀ Emission sind eher unbefriedigend und zu ungenau, wie etwa die EPA Formel aus den USA, die jedoch von Experten angezweifelt wird. Der PM₁₀-Emissionsfaktor wird hierbei über zwei Parameter, der Staubbeladung der Straße in g/m² und dem mittleren Gewicht der Fahrzeuge der Fahrzeugflotte in Tonnen berechnet. Einer für Deutschland anwendbare Empfehlung für ein vorläufiges PM₁₀-Emissionsmodell liegen unter anderem Emissionsdaten aus Abrieb und Aufwirbelung aus einer modifizierten Formel zu Grunde. Genaue Angaben zur Formel und Erläuterungen finden sich in LOHMEYER & DÜRING 2001.

1.1.2 Reduzierungsansätze und Filterwirkung von Pflanzen

Bei der Erstellung von Luftreinhalte- sowie Aktionsplänen zeigt sich, dass Begrünungsmaßnahmen zur PM₁₀ und PM_{2.5} Reduktion nur eine untergeordnete Rolle spielen. Der Hauptfokus liegt auf dem Straßenverkehr, da sich die höchsten PM₁₀ Werte in Ballungsgebieten an stark befahrenen Straßen finden. Eine Studie des Umweltbundesamtes (DIEGMANN et al. 2006) zeigt, dass unter den verkehrlichen Maßnahmen zur Reduzierung von Feinstaub die Umweltzonen das höchste Minderungspotential (10% Reduktion des Jahresmittelwertes von PM₁₀) aufweist. Eine Nachrüstung der KFZ mit Partikelfiltern würde eine geschätzte Reduktion des Jahresmittelwertes von PM₁₀ von 6 % bewirken (DIEGMANN et al. 2006).

Straßenabspülversuche in der Frankfurter Allee in Berlin zeigten keinen eindeutigen Minderungseffekt auf die PM₁₀-Belastungen (DÜRING et al. 2004).

Viele Städte (z.B. Stadt Bremen) sehen keine Begrünungsmaßnahmen vor, mit der Argumentation, dass eine Quantifizierung der Filterleistung nicht gegeben sei (METTO 2008). Oftmals sei zudem nicht genug Platz für eine ausreichende Begrünung in Ballungsgebieten (z.B. Stadt Hagen). In Essen hat man sich aufgrund von verschiedenen externen Studien dazu entschieden, Fassadenbegrünung der Mittelstreifenbegrünung vorzuziehen.

In der Industrie steht eine Reihe von Technologien zur Staubminderung zur Verfügung. Am häufigsten werden elektrostatische Abscheider (ESP) und Gewebefilter verwendet, bei Müllverbrennungsanlagen finden sich zudem

verschiedene Kombinationen von Entstaubungseinrichtungen und Nasswäschern (UMWELTBUNDESAMT GMBH WIEN 2006).

Die Filterwirksamkeit von Pflanzen setzt sich aus 2 Komponenten, der aktiven und passiven Filterwirkung zusammen (WENTZEL 1968). Bei der aktiven Filterwirkung stellt Vegetation eine große Oberfläche dar, auf denen Immissionen durch Pflanzen abgeschieden werden können. Bereits sedimentierte Partikel werden zurückgehalten, können durch Rain-out gelöst und dem Boden zugeführt werden. Unter der passiven Filterwirkung versteht man die Ablenkung des Luftstroms, es entstehen Geschwindigkeits- und Richtungsänderungen, durch die vermehrt Luftverunreinigungen ausfallen (BLUM 1965).

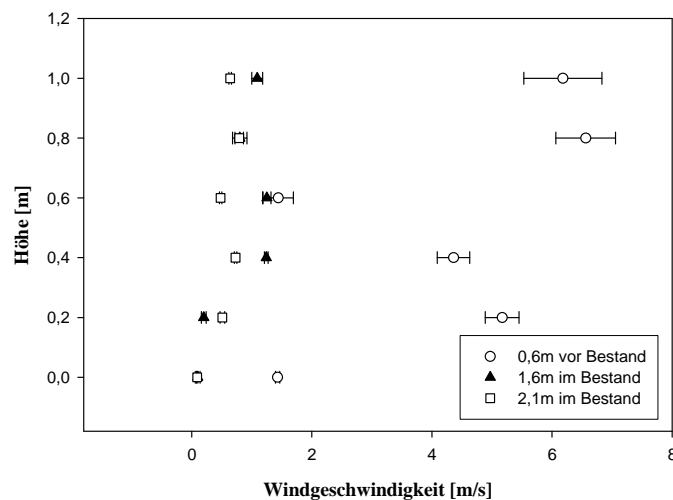


Abb.1: Windgeschwindigkeiten in homogenen Beständen von Goldrute (*Solidago virgaurea*) nach artifizierter Bewindung. (PFANZ et al. 2006)

Innerhalb eines Pflanzenbestandes wird die Windgeschwindigkeit drastisch abgeschwächt (Abb. 1), sodass im Bestandesinneren nahezu windstille Räume zu finden sind (PFANZ et al. 2006). Andere Daten gehen von einer Windabschwächung um wenigstens 10 % etwa im Bereich der fünffachen Höhe der Pflanzung vor und der 25fachen Höhe hinter der Pflanzung aus (NÄGELI 1943,1954). Anpflanzungen wirken als Staubfilter besonders dann, wenn sie senkrecht zur Hauptwindrichtung liegen. Die im Luftstrom enthaltenen Partikel sedimentieren passiv durch den windberuhigten Kronenraum in das Innere des Waldes hinein (HENNEBO 1955). Das gleiche Prinzip gilt auch für windberuhigte Räume in Bodennähe, z.B. für Straßenbegleitgrün in Städten.

Untersuchungen zum Staubfangvermögen von Stadtgrün an einer Autobahn zeigten, dass nicht da wo der meiste Staub anfällt die Blätter den größten Staubbelaag aufweisen, sondern im Bestand selber. Die Windstärke an den Straßen wird im Bestand durch die Gehölze um mehr als die Hälfte vermindert. An der Straße ist die Turbulenz so groß, dass dadurch eine Sedimentation erschwert wird (HELBING 1973). Bereits früh erkannte man die nützliche Wirkung von Begrünung und Windschutzstreifen. So führt sie lokal zur Herabsetzung der Verdunstung, Erhöhung der Luft- und Bodenfeuchtigkeit sowie der Luft- und Bodentemperatur (NÄGELI 1943). Einen positiven Effekt auf das Staubfangvermögen hat eine möglichst tiefe, dicht an die Straße heranreichende Grasfläche, in Kombination mit zur Staubquelle hin relativ offen bepflanzten Bäumen (BECK 1969, HENNEBO 1955). Eine schmale und dichte Bepflanzung ist zu vermeiden, stattdessen ist auf eine geschichtete Blattstruktur zu achten (SWAAGSTRA & DE KLUIVER 2006). Windschutzpflanzungen sollten nach Möglichkeit 10-30 m breit sein. Der Bestandesrand sollte an beiden Seiten stufig und das Kronendach gegen Turbulenz unregelmäßig aufgebaut sein (OLSCHOWY 1966).

Tab. 1: Windgeschwindigkeiten in der Wirbelschlepe vorbeifahrender Kraftfahrzeuge. Die Messungen wurden direkt am Straßenrand in verschiedenen Höhen über Grund durchgeführt (PFANZ et al. 2006)

<i>Geschwindigkeit des Fahrzeugs</i>	<i>25 km/h</i>	<i>50 km/h</i>	<i>75 km/h</i>
<i>Windgeschwindigkeit in der erzeugten Wirbelschlepe in m/s</i>			
In 100 cm Höhe	0,6 m/s	1,15 m/s	1,9 m/s
In 75 cm Höhe	0,9 m/s	1,2 m/s	2,4 m/s
In 50 cm Höhe	1,3 m/s	1,75 m/s	3,4 m/s
In 25 cm Höhe	1,4 m/s	1,6 m/s	3,6 m/s
In 10 cm Höhe	1,3 m/s	3,4 m/s	4,7 m/s

Die höchsten verkehrsbedingten Windgeschwindigkeiten werden in bodennahen Luftschichten gemessen, was Untersuchungen von PFANZ et al. 2006 zeigten (Tab. 1). Dabei werden im bodennahen Bereich zwischen 10 und 25 cm Windgeschwindigkeiten von bis zu 5 m/s erreicht.

Für eine effektive Staubfilterung durch Vegetation an dieser Stelle wird neben einer geeigneten Gehölzwahl auch die Pflanzung einer Kraut- und Strauchschicht empfohlen (PFANZ & FLOHR 2007). Diese bodennahen Schichten aus Gräsern und Kräutern reduzieren die Windgeschwindigkeiten und schaffen dadurch windberuhigte

Räume, in denen Stäube sedimentieren können (BECKRÖGE 1999, CAMPBELL & NORMAN 1998, FELLENBERG 1999, PFANZ et al. 2006, SWAAGSTRA & DE KLUIVER 2006). Die Vegetationsschicht kann zudem als Impaktionsoberfläche dienen, auf die die aufgewirbelten Partikel treffen können und somit aus der Atmosphäre gefiltert werden können.

1.1.3 Allgemeiner Einfluss von Staub auf pflanzliche Oberflächen

Allgemein beinhaltet Straßenstaub einen Großteil an Rußpartikeln, die als Ablagerung auf Blättern wie ein schwarzer Körper fungieren und die Strahlung absorbieren und so eine eindeutige Temperaturerhöhung der Blätter verursachen. Dabei sind Blattober- als auch Blattunterseiten gleichermaßen von den Temperaturerhöhungen betroffen (ELLER 1974). Je nach Staubauftrag können bestaubte Blätter zwischen 2-6°C wärmer sein als unbestaubte Kontrollblätter (FLÜCKIGER et al. 1978). Steigt die Temperatur im Blatt über 45°C so kann es zur Denaturierung der Proteine und zur Zerstörung der thermolabilen Enzymsysteme kommen. Ebenso kann es zu Verbrennungen der Blattoberfläche durch Staubauflagerungen kommen (FLÜCKIGER et al. 1978). Erhöhte Blatttemperaturen, die durch schwarzen Staubauftrag bedingt sind, bewirken eine gesteigerte Transpiration, die insbesondere bei trockenen Schönwetterlagen zu einem abnehmenden Wasserpotential in Blättern führen kann (GATES 1965, RASCHKE 1970).

Die im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Stäube sind beide natürlichen Ursprungs und wirkten sich nicht toxisch auf die Oberflächen von Pflanzen aus. Die hellgelbe Farbe der Keulenbärlappsporen dürfte keine Temperaturerhöhung bedingen, da sie nicht wie schwarze Körper wirken. Für das hellbraun gefärbte Fimonit sind die gleichen spektralen Eigenschaften anzunehmen. Weiterführende Angaben zu den spektralen Eigenschaften von Blättern finden sich bei GATES et al. 1965 und ELLER 1972.

Staub und Partikel können aus chemisch inerten Substanzen wie Bodenpartikeln, Quarz, Glimmer und Ruß bestehen oder sind mehr oder weniger reaktiv wie Zementstaub, Dünger, Ammoniumsulfat, Schwefelsäure und Metalloxide. All diese modifizieren die Benetzbarkeit, Permeabilität, Reflektion, Wasserverlust und den

Gaswechsel (JUNIPER & JEFFREE 1983). Je nach chemischer Zusammensetzung können Partikel von der Pflanzenoberfläche aufgenommen und düngend wirken, oder es kann zu Verletzungen der Pflanzenoberfläche kommen (GRANTZ et al. 2003). ENGELKE & MARSCHNER (1991) stellten in ihren Untersuchungen fest, dass Flugasche phytotoxische Borgehalte aufweist. Durch hohe Borgehalte innerhalb des Blattes trocknen die Blätter von den Rändern her ein.

Staub kann zudem die Morphologie von Blütenblättern verändern. So absorbiert Zementstaub die Feuchtigkeit von deren Oberfläche und verändert die Anordnung der Papillen (MISRA et al. 1993).

Aufgrund der heterogenen Zusammensetzung der verschiedenen Stäube ist es schwierig, deren Auswirkungen auf die Vegetation experimentell zu untersuchen und allgemeingültige Aussagen zu treffen.

Es besteht ein direkter Zusammenhang zwischen durch Staub verstopften Stomata und geringem stomatären Diffusionswiderstand (FLÜCKIGER et al. 1977). Kleinste Staubpartikel dringen in Stomata ein und hemmen den Schließmechanismus. Messungen des stomatären Diffusionswiderstandes an Blattflächen von Topfpflanzen, die an der Autobahn exponiert wurden, ergaben im Vergleich zu Kontrollpflanzen während heißer Sommertage stets signifikante Werte über die Mittagszeit hinweg (FLÜCKIGER et al. 1977, RICKS & WILLIAMS 1974). RICKS UND WILLIAMS (1974) fanden einen verringerten Diffusionswiderstand bei *Quercus petraea* durch Industriestaub verstopfte Stomata. Verstopfung der Stomata führt zu einer Beeinträchtigung des Gasaustauschs, Transpiration, Wasserhaushalt und Wärmeregulation (BOHNE 1963, 1973). An Autobahnen exponierte Pflanzen zeigten einen signifikant niedrigeren Diffusionswiderstand als an Kontrollpflanzen, die in relativ reiner Luft standen. Dies kann an heißen und trockenen Tagen zu erhöhtem Wasserstress, einem verringertem Wachstum und frühzeitigem Absterben führen (FLÜCKIGER et al. 1977, 1978). Die Einwirkung von schadstoffhaltigen Aerosolteilchen auf Pflanzen wird bestimmt durch die Retentionszeit der auf der Blattoberfläche abgelagerten Teilchen und der Mobilität und Reaktivität der mit dem Aerosolpartikel assoziierten Schadstoff (HOSKER & LINDBERG 1982). Durch verstopfte Stomata erhöht sich zum einen die Transpiration, zudem können die Pflanzen dadurch Trockenstress ausgesetzt sein (FARMER 1993). Sind Blätter besonders starken Staubdepositionen ausgesetzt (30g/m²/Monat), so kann es zu einer Lichtreduktion von bis zu 50% kommen (HELBING 1973).

Die besonders in Bodennähe durch KFZ entstehenden Wirbelschleppen als auch allgemeine Windbewegungen können sich negativ auf das Pflanzenwachstum auswirken. Es kann mechanisch zu Abrasionen kommen, die die Oberfläche schädigen und so Eintrittspforten für Pathogene bilden können.

Die ständige Bewegung der Pflanze kann zu einer verminderten Photosyntheserate führen, die Atmungsrate erhöhen und allgemein das Pflanzenwachstum mindern (FLÜCKIGER et al. 1978). Durch eine Staubauflagerung kann es ebenfalls zu einer verminderten Transpiration kommen, so dass ein zusätzliches Schutzpotential von Epidermis und Kutikula vorhanden ist (SPERBER 1975).

An jungen, vier Wochen alten Blättern von *Cucumis sativus* und *Phaseolus vulgaris* konnte der Einfluss von Staubauflagerungen auf die Photosynthese bedingt durch Beschattung und steigender Blatttemperatur festgestellt werden (HIRANO et al. 1995). Allgemein wirkte sich sehr feiner Staub stärker auf die Reduktion der Photosynthese aus als gröberer Staub. In der Nähe von Kraftwerken wurden auf Pflanzenoberflächen zwischen 5 und 20 g/m² Staubauflagerungen gefunden, welche im Größenbereich feiner und ultrafeiner Partikel lagen (BRABEC et al. 1981).

1.2 Partikel in der Atmosphäre

1.2.1 Definition, Vorkommen, Entstehung, Grenzwerte

Allgemein werden in der Luft verteilte Feststoffe unter dem Begriff Staub oder auch Partikel zusammengefasst. Dabei ist deren physiko-chemische Zusammensetzung genau so vielschichtig wie deren Herkunft (FLOHR & PFANZ 2007).

In der Richtlinie 1999/30/EG des Rates vom 22. April 1999 über Grenzwerte für Schwefeldioxid, Stickstoffoxide, Partikel und Blei in der Luft wurden folgende Definitionen für PM₁₀ und PM_{2.5} festgelegt: „PM₁₀ sind die Partikel, die einen größenselektierenden Lufteinlass passieren, der für einen aerodynamischen Durchmesser von 10 µm eine Abscheidewirksamkeit von 50% aufweist. PM_{2.5} sind die Partikel, die einen größenselektierenden Lufteinlass passieren, der für einen aerodynamischen Durchmesser von 2,5 µm eine Abscheidewirksamkeit von 50 % aufweist“ (EU 1999). Der aerodynamische Durchmesser ist definiert als berechneter Durchmesser einer Kugel mit der Dichte von 1 g/cm³, die die gleiche Sinkgeschwindigkeit in der Luft aufweisen würde wie das betrachtete Partikel (HLUG 2007). Umgangssprachlich wird PM₁₀ auch als Feinstaub bezeichnet.

Auf internationaler Ebene bezeichnet man die feinsten Teilchen in der Atmosphäre als Particulate Matter (PM). Der Begriff Schwebstaub (total suspended particulates, TSP) beschreibt die Aerosolkomponente der in der Luft vorhandenen Partikel bis zu einem oberen aerodynamischen Durchmesser von rund 30 µm (DIN & KRdL 2006).

Das Verhältnis PM_{2.5}/PM₁₀ liegt im Allgemeinen zwischen 0,8 und 0,9 (KAPPOS et al. 2004).

Deutschland hat die Vorgaben des EU Rechts im Jahr 2000 durch Änderungen des Bundesimmissionsschutzgesetzes und eine neue Verordnung über Immissionswerte für Schadstoffe in der Luft (22. BImSchV) in nationales Recht umgesetzt (DIEDERICHSEN 2005). Aufgrund der gesetzlichen Bestimmungen sind Städte und Kommunen verpflichtet, die festgelegten Grenzwerte einzuhalten und bei Überschreitungen durch geeignete Aktionspläne entgegenzuwirken.

Die gerade in Ballungszentren häufiger überschrittenen Grenzwerte für PM₁₀ (z.B. 41 Überschreitungen im Jahr 2009 an der Gladbeckerstraße in Essen, UMWELTBUNDESAMT 2009) als auch die ab dem 01.01.2010 geltenden verschärften Grenzwerte (Tab.2) erhöhen den Handlungsbedarf deutlich.

Die großen Ballungsräume wie Köln, München, Stuttgart, Duisburg und Leipzig haben Schwierigkeiten, die europäischen Grenzwerte einzuhalten, so dass viele Städte und Regionen zunächst mehr Zeit von der EU-Kommission erhielten. Die Feinstaubgrenzwerte müssen jedoch bis spätestens 11. Juni 2011 und die Stickstoffdioxidgrenzwerte ab 2015 eingehalten werden (UMWELTBUNDESAMT 2010).

Tab. 2: Internationale Grenzwerte PM10, PM2.5 und WHO Richtgrenzwert
(Zusammenstellung nach BAFU 2006; RICHTLINIE 2008/50/EG; WHO 2004,2005)

	PM10		PM2.5	
EU - Staaten	40 µg/m³	Stufe 1: Jahresmittelwert (1.1.2005)	25 µg/m³	Jahresmittelwert; Einhaltungsfrist des Grenzwertes bis 1.1.2015
	50 µg/m³	Stufe 1: 24-h-Mittelwert, max. 35 Überschreitungen erlaubt (ab 1.1.2005)	20 µg/m³	Jahresmittelwert; Einhaltungsfrist des Grenzwertes bis 1.1.2020
	20 µg/m³	Stufe 2: Richtgrenzwert: Jahresmittelwert (ab 1.1.2010)		
	50 µg/m³	Stufe 2: Richtgrenzwert: 24-h-Mittelwert, max. 7 Überschreitungen erlaubt (ab 1.1.2010)		
USA	150 µg/m³	24-h-Mittelwert; 1	15 µg/m³	Jahresmittelwert
Kalifornien	20 µg/m³	Überschreitung pro Jahr	35 µg/m³	24-h- Mittelwert
	50 µg/m³	Jahresmittelwert 24-h-Mittelwert	12 µg/m³	Jahresmittelwert
Japan	100 µg/m³	24-h-Mittelwert	12 µg/m³	Jahresmittelwert
WHO	200 µg/m³	1-h-Mittelwert		
	20 µg/m³	Richtgrenzwert für das Jahresmittel	10 µg/m³	Richtgrenzwert für das Jahresmittel
	50 µg/m³	Richtgrenzwert für das Tagesmittel; 3 Überschreitungen pro Jahr	25 µg/m³	24-h-Mittelwert

Zu den natürlichen Partikeln gehören biologisches Material wie Sporen, Pollen und Pflanzenfragmente als auch durch Winderosion freigesetzte, geogene Partikel (Bodenerosion). Zu weiteren natürlichen Quellen zählen Emissionen aus Wald- und Buschfeuern, Meeresgischt und Vulkanausbrüchen (BAFU 2006). Beim Ausbruch des Mount St. Helens 1980 in den USA wurden beispielsweise 10^{13} kg Staub emittiert (FRITSCH 1990).

Anthropogene Quellen von PM10 sind verstärkt Verkehr, Kraft- und Fernheizwerke als auch Verbrennungsanlagen und privater Hausbrand.

Den Einfluss von Verkehr auf die PM10 Konzentration belegen Untersuchungen in Karlsruhe. Dort führte die vollständige Straßensperrung der Innenstadt aufgrund der

Tour de France für 10 Stunden zu einem deutlichen Rückgang des PM₁₀ Tagesmittelwertes um 5-6 µg/m³, was einer Reduktion von 20-30 % entspricht (LUBW 2005).

Ein Beispiel für die prozentuale Verteilung von PM₁₀-Emissionen in Deutschland ist *Abb.2* zu entnehmen.

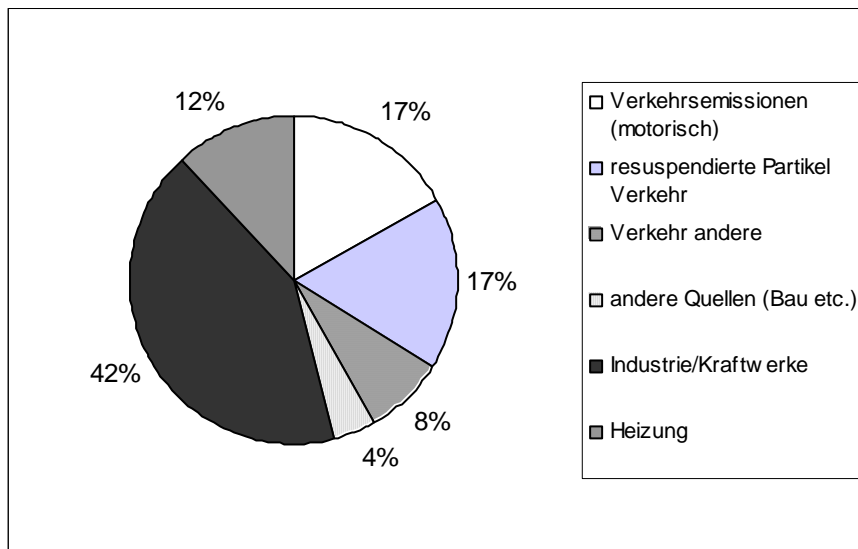


Abb. 2: PM₁₀-Emissionen in Deutschland 1998 (LENSCHOW et al. 2001)

Rund 2×10^9 Tonnen Aerosol gelangen jährlich in die Atmosphäre, davon sind rund 35 % auf anthropogene Aktivitäten zurückzuführen (FRITSCH 1990).

Durch industrielle Prozesse und Kraftwerke wird der größte Teil des Feinstaubes emittiert. Fasst man die durch Verkehr bedingten Feinstaubanteile zusammen, so beträgt dieser etwa 42 %. Der verkehrsbedingte Anteil unterliegt natürlichen Schwankungen und ist von vielen Parametern (z.B. Verkehrsaufkommen) abhängig. So gibt der REGIONALVERBAND RUHR einen durch Verkehr verursachten PM₁₀ Anteil von 50 % und mehr an. Die Verkehrsemissionen setzen sich zum einen aus Brems- und Kupplungsabrieb zusammen, zum anderen aus direkt emittierten Partikeln aus den Verbrennungsprozessen der Kfz-Motoren (vorwiegend Dieselfahrzeuge). Die Größe von emittierten Partikeln aus Diesel und Benzinfahrzeugen beträgt durchschnittlich 0,05-1µm (KUMAR & BRITTER 2006), während der Straßenverkehr für 41 % der unter 2,5 µm großen Partikel verantwortlich ist (GREENWOOD et al. 1996). Dieselruß, der unterschiedliche Korngrößen enthält, ist eine beachtliche Quelle für Feinstaub.

Der Abrieb von Bremsbelägen wird zwischen 10-20 mg/km geschätzt, um einiges höher liegt er bei Schwerlastkraftwagen. Bremsabrieb besteht neben Antimon hauptsächlich aus Schwermetallen (u.a. Eisen, Chrom, Mangan), deren Zusammensetzung stark vom jeweiligen Hersteller abhängt (HEINRICHS & BRUMSACK 1997).

Etwa 10 % des entstandenen Staubes verbleibt in der Bremsanlage, während der Hauptteil auf der Fahrbahndecke liegen bleibt. Schätzungen gehen davon aus, dass nur 3,2 % des Bremsabriebes in die Atmosphäre gelangen (RAUTERBERG-WULFF 1998). Asphaltabrieb wird zwischen 3,8 und 38 mg/km geschätzt.

Die Reifenabnutzung von KFZ variiert zwischen 10-90 mg/Reifen/km. Die chemische Zusammensetzung von Reifenabrieb beinhaltet Benzothiazole, Styrol-Butadien-Kautschuk und Zink (EUROPEAN COMMISSION 2004). Reifenabrieb entspricht in der Regel einer Partikelgröße $> 4 \mu\text{m}$, zudem bleibt ein Großteil des freigesetzten Abriebes auf der Fahrbahndecke liegen (RAUTERBERG-WULFF 1998).

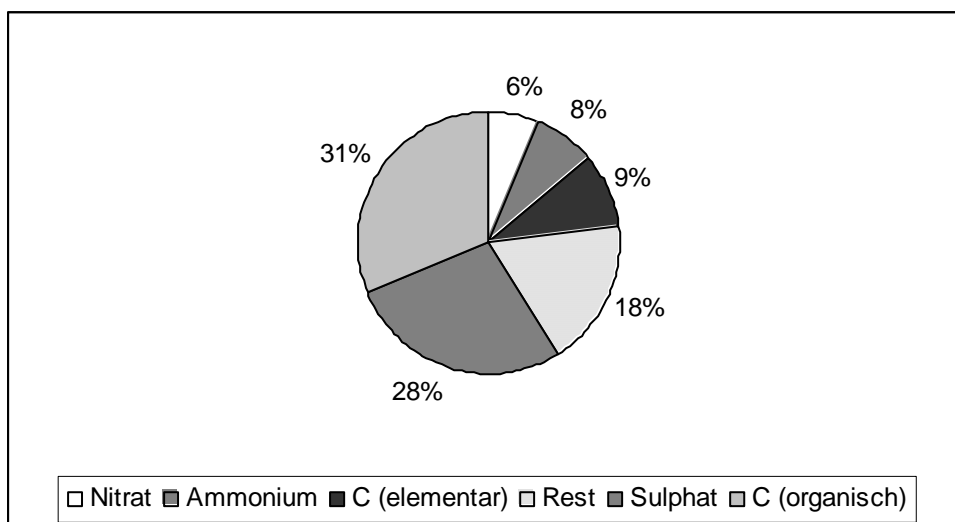


Abb. 3: Durchschnittliche chemische Zusammensetzung eines urbanen Aerosols, verändert nach LFU/UMEG 1998

Konstante Elemente von Partikeln (Abb. 3), die auf Blattflächen gefunden wurden sind u.a. C, O, K, Ca, Si, Al, Mg, Na, Fe und S (WANG et al. 2006). Weitere Angaben zur PM₁₀ Zusammensetzung liegen u.a. für die Messstation an der Universität Duisburg (Messstation des IUTA) vor, die einen Anteil von 24 % für Kohlenstoffverbindungen und 40 % sekundärer Ionen wie Nitrat, Sulfat und Ammonium feststellten. 5 % bestehen aus Seesalzkomponenten wie Natrium, Magnesium und Chlor, 8 % entstammen Erdkrustenelementen und Metallen. Ein Rest von 23% besteht zum größten Teil aus Silizium und Wasser (IUTA 2004).

Man unterscheidet primäre Partikel, die direkt von einer Quelle stammen, wie. einem Verbrennungsprozess, von sekundären Partikeln, die aus gasförmigen Vorläufersubstanzen entstehen (z.B. SO_2 , NO_2 , NH_3). Aerosole aus SO_4^{2-} , NO_3^- , NH_4^+ haben im Mittel eine Größe von $0,1-1 \mu\text{m}$ im Durchmesser, Schwermetalle wie beispielsweise Pb, Cd, Zn und Cu sind etwa $0,1-0,5 \mu\text{m}$ im Durchmesser groß (FOWLER et al. 1999).

Der komplexe Zusammenhang von Partikeln in der Atmosphäre ist in Abbildung 4 dargestellt. Als sekundäres Aerosol wird Ammoniumnitrat aus Stickstoffoxiden und Ammoniak gebildet, währenddessen Ammoniumsulfat durch Schwefeldioxid und Ammoniak als sekundäres anorganisches Aerosol vorliegt (UMWELTBUNDESAMT GMBH Wien 2006).

Bereits bei relativ geringer Luftfeuchte können sich aus Partikeln, die aus wasserlöslichem Material bestehen, über hygroscopisches Wachstum, wässrige Lösungstropfen bilden (PÖSCHL 2006). Über verschiedene Wege (Kondensation, Koagulation, Aggregation) verändern sich Partikel und können somit aus der Atmosphäre entfernt werden. Die an Blattoberflächen haftenden Aerosolpartikel können als Absorbentien für Gase, als Ionenaustauscher für das Interzeptionswasser, als Katalysatoren für chemische Reaktionen und als Kondensationskeime von Wassertröpfchen wirken (SIMMLEIT et al. 1986).

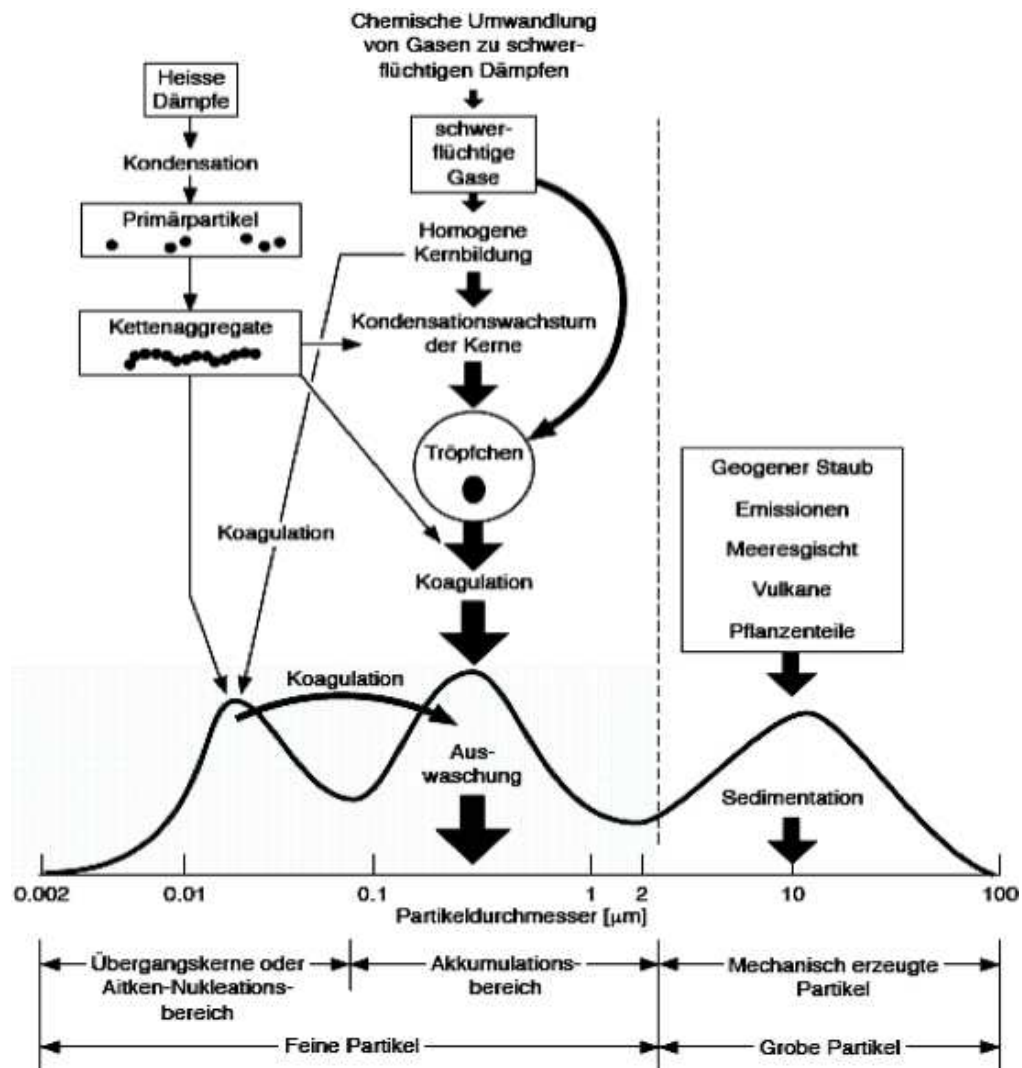


Abb. 4: Partikel in der Troposphäre (ZIMMERMANN et al. 2006)

Neben der Einteilung nach der Herkunft können Partikel zudem nach ihrem durchschnittlichen Durchmesser eingestuft werden, wie in Tabelle 3 ersichtlich.

Tab. 3: Korngrößenbasierte Einteilung von Staubfraktionen (LAHMANN 1990)

Staubfraktion	Durchmesser [μm]
Grobstaub	> 50
Mittelstaub	10 – 50
Feinstaub	0,5 – 10
Feinststaub	< 0,5

Daneben werden noch Ultrafeine Partikel (UP bzw. UFP) unterschieden. Sie sind Nanopartikel mit einem Durchmesser von weniger als 0,1 μm .

Eine beispielhafte Verteilung der Korngrößen von Staub in Deutschland ist Tabelle 4 zu entnehmen.

Tab. 4: Korngrößenverteilung von Staub in Deutschland (PETERS et al. 1998)

Korngröße [μm]	Verteilung [%] mit SD
≤ 60	98 +/- 2
≤ 30	95 +/- 3
≤ 20	91 +/- 5
≤ 10	84 +/- 7
≤ 6	73 +/- 7
$\leq 3,5$	62 +/- 12
≤ 2	51 +/- 14
≤ 1	35 +/- 10
$\leq 0,6$	22 +/- 7
$\leq 0,4$	11 +/- 4

Typische Konzentrationsbereiche von PM₁₀ liegen für das Jahr 2001 im ländlichen Bereich bei 10-18 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ im Jahresmittel, im städtischen Hintergrund bei 2-30, und im verkehrsnahen Raum bei 30-45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ im Jahresmittel (DIN & KRDL 2006). Dabei fällt auf, dass die PM₁₀ Werte in verkehrsnahen und industriell genutzten Gebieten deutlich höher als im ländlichen Bereich liegen. Untersuchungen am Standort Duisburg belegen einen erheblichen Anteil der PM_x Massenkonzentration durch Straßenverkehr (IUTA 2004). Fallen ungünstige meteorologische Bedingungen, überregionaler Transport sowie die variable, im Wochenverlauf schwankende PM₁₀ Emission durch Verkehr zusammen, treten Überschreitungen der PM₁₀ Tagesgrenzwerte auf.

Durch Niederschlagsereignisse sowie Luftaustausch kommt es zur Auswaschung und Verdünnung von Partikeln in der Atmosphäre. Erhöhte Partikelkonzentrationen

treten in der Regel während Hochdruckwetterlagen und Windschwäche auf und sind mit längeren Trockenperioden verbunden (DRÖSCHER 1990).

Die Partikelkonzentrationen unterliegen großen zeitlichen Schwankungen, wobei in Quellgruppen ähnliche Partikelkomponenten auftreten, sodass über diese Leitsubstanzen identifiziert werden können. Im Winter lassen sich Partikelkomponenten verstärkt aus Verbrennungsprozessen erkennen, währenddessen die Partikel im Sommer heterogener zusammengesetzt sind.

Im Sommer werden generell geringere Partikelkonzentrationen als im Winter gemessen. Häufige Inversionswetterlagen in der kalten Jahreszeit schränken den Austausch zwischen den bodennahen, partikelreichen und den höher gelegenen, sauberen Luftschichten ein (HUPFER & KUTTLER 1998, KUTTLER 1998). Partikel die kleiner als 1 μm sind, schweben bis zu mehreren Tagen in der Atmosphäre und werden letztlich durch Agglomeration zu größeren Partikeln und durch nasse Deposition aus der Atmosphäre entfernt (METTO 2008).

1.2.2 Abscheidemechanismen

Die Entfernung von Partikeln aus der Atmosphäre geschieht weitestgehend über fünf Prozesse, die bereits grundlegend erforscht wurden (BECKETT et al. 2000, PFANZ et al. 1990, PFANZ & BEYSLAG 1993, SCHREIBER et al. 1993, SLINN 1982).

Diese sind Sedimentation, Diffusion, Impaktion, trockene und nasse Deposition.

Je nach der Größenfraktion von Staubpartikeln, ihrer Oberflächenstruktur, der physiko-chemischen Oberflächenbeschaffenheit sowie mikroklimatischer Bedingungen werden partikuläre Aerosole unabhängig von ihrer Entstehung entweder sedimentiert oder adsorbiert bzw. impaktiert (FLOHR & PFANZ 2007, PFANZ et al. 2006, PFANZ & FLOHR 2007).

BECKETT et al. 1998 stellten fest, dass der wichtigste Ablagerungsprozess auf Blättern die Impaktion ist. Sie entsteht, wenn ein laminarer Luftstrom von einer rauen Oberfläche unterbrochen wird. Weisen Blätter eine raue runzelige Oberfläche auf, wird die Turbulenz erhöht, die wiederum die Impaktion fördert.

Tab. 5: Abscheidemechanismen verschiedener Partikel aus der Atmosphäre verändert nach CHAMBERLAIN & LITTLE 1981

Partikel	Größe [µm]	Art der Ablagerung
Staub (Boden und Straße)	10 - 100	Sedimentation
Sporen, Pollen	5 - 50	Sedimentation, Impaktion
Flugasche	1-20	Sedimentation, Impaktion
Blei (von KFZ)	0,04 – 1	Brownsche Diffusion
Anthropogener Rauch	0,04 – 1	Brownsche Diffusion

Allgemein beeinflussen Windgeschwindigkeiten, Lufttemperatur, Inversionen und Wolken Partikelbewegungen (EDMONDS & DRIVER 1974).

Teilchen über 10 µm sedimentieren rasch und werden so aus der Luft entfernt.

Ultrafeine Teilchen haben hohe Diffusionsgeschwindigkeiten und koagulieren innerhalb weniger Stunden mit größeren Partikeln, setzen sich auf Oberflächen ab oder wachsen durch Kondensation. Teilchen in einem Größenbereich von 0,1-1 µm bilden massenmäßig den Hauptteil des Aerosols und werden hauptsächlich durch Niederschläge aus der Atmosphäre entfernt, zum Teil durch Impaktion (BAFU 2006).

Der vertikale Transport von Partikeln ist bedingt durch die aerodynamische Rauigkeit, Windgeschwindigkeit und den vertikalen Temperaturgradienten (THOM 1975). Partikel nehmen bei hoher relativer Feuchte sehr viel Wasserdampf auf und quellen. Die Massenzunahme der Partikel beim Quellen begünstigt Sedimentations- und Trägheitsabscheidung (Tab.5).

In der Atmosphäre können vielfältige Umwandlungsprozesse die chemische und physikalische Beschaffenheit von Partikeln ändern. Wichtige Wechselwirkungen mit der Umgebungsluft sind chemische Reaktionen sowie Kondensations- und Verdampfungsprozesse (DRÖSCHER 1990). Die Rauigkeit von Wäldern erhöht den turbulenten Transport über und innerhalb der Baumkronen, verkleinert die Stärke der laminaren Grenzschicht und führt zu höherer Partikeldeposition (ERISMANN et al. 1997, PETERS & EIDEN 1992, SIEVERING et al. 1994).

Zunächst werden die Partikel aus der freien Atmosphäre in einem turbulenten Strömungsregime durch die aerodynamische Grenzschicht zur Rezeptoroberfläche transportiert (durch turbulente Diffusion und Sedimentation), dann werden sie durch Brownsche Diffusion, Interzeption, Impaktion und /oder Sedimentation durch die laminare Grenzschicht transportiert und gelangen schließlich durch Wechselwirkungen (Adsorption und Absorption) auf die Oberfläche (DAVIDSON & WU 1990). Welcher Transportprozess jeweils dominierend ist, hängt weitgehend von der

Größenverteilung der Partikel ab (CHAMBERLAIN 1967,1975, FOWLER & LEITH 1985, SEHMEL 1980, SLINN 1982).

Sedimentation

Der einfachste Depositionsmechanismus ist die Sedimentation. Dabei fallen atmosphärische Partikel im Schwerfeld der Erde relativ zur Umgebungsluft nach unten, wenn nicht andere Kräfte überwiegen. Die Sinkgeschwindigkeit nimmt solange zu, bis sich ein Kräftegleichgewicht zwischen Gravitationskraft und dem Luftwiderstand des Teilchens einstellt. Bei niedrigen Relativgeschwindigkeiten zwischen Teilchen und Umgebungsluft und der Annahme kugelförmiger Partikel kommt das Stokes'sche Widerstandsgesetz für laminare Strömung zur Anwendung (DRÖSCHER 1990). In erster Näherung steigt somit die Sinkgeschwindigkeit mit dem Quadrat des Teilchendurchmessers an.

Sedimentation beherrscht die Abscheidung größerer Partikel, bei geringer Luftbewegung ($< 0,3 \text{ m/s}$) und auch die der Teilchen zwischen 1 und $10 \mu\text{m}$.

Impaktion

Partikel werden impaktiert, wenn deren Anfluggeschwindigkeit auf ein Hindernis größer als 1 m/s ist und die Partikel in der Größenordnung von $\geq 10 \mu\text{m}$ liegen (Abb. 5). Eine nasse, behaarte oder anderweitig aufgeraute Auffangfläche begünstigt die Impaktion (SMITH 1990). Bei Grobstaub spielen Impaktion und Interzeption eine große Rolle.

Trockene und nasse Deposition

Unter trockener Deposition versteht man hierbei die Ablagerung in niederschlagsfreien Perioden. Trockene Deposition von Gasen und Partikeln ist beeinflusst von Faktoren, die den turbulenten Transport beeinträchtigen, wie Windgeschwindigkeit, Baumhöhe, Kronendichte, LAI, Niederschlag, relative Luftfeuchte und Globalstrahlung (ERISMANN & DRAAIJERS 2003).

Es gibt einen linearen Zusammenhang zwischen trockener Deposition und dem LAI, wie Abwaschexperimente (LINDBERG et al. 1988) und Depositionsmodelle (LOVETT & REINERS 1986) zeigen konnten. Die Deposition von Partikeln ist abhängig von den Eigenschaften des Aerosols (Größe, chemische Eigenschaften, Wolkendichte) als auch den Blatteigenschaften wie Rauigkeit, Haare, Feuchtigkeit und Klebrigkeit.

Depositionsuntersuchungen im Windkanal mit Bleichlorid (Durchmesser 3,36 μm) an verschiedenen Pflanzen (u.a. *Helianthus annuus*, *Liriodendron tulipifera*) zeigten, dass die siebenfache Menge an Staub auf haarigen Blättern deponierte als auf glatten, wachsigen Blättern (WEDDING 1977). Trockene Deposition von PM₁₀ auf Pflanzen und Böden ist sehr langsam gegenüber der nassen Deposition, jedoch betrifft es alle Oberflächen und findet kontinuierlich statt (GRANTZ et al. 2003).

Wie effizient trockene Deposition ist, hängt von einer bestimmten Größe der Depositionsgeschwindigkeit (cm/s) ab. Dabei gilt je größer die Depositionsgeschwindigkeit, desto schneller werden Partikel abgeschieden. Die geringsten Depositionsgeschwindigkeiten weisen Partikel zwischen 0,1 und 1 μm im Durchmesser auf, die somit ebenfalls die geringsten Abscheidungen auf Oberflächen aufweisen (SLINN 1982).

Unter nasser Deposition versteht man, dass sich bei Niederschlagsereignissen Aerosolpartikel an Regentropfen oder Schneeflocken anlagern und mit diesen zum Boden gelangen (JONAS 1984). Wasserlösliche Partikel, welche auf Pflanzenoberflächen abgelagert sind, können sich von der Oberfläche lösen und mit dem Niederschlagswasser abgewaschen werden (Wash-out). Nach Berechnungen von AHMED (1979) ist bei der atmosphärischen Aktivitätsverteilung die Ausscheidung durch Wash-out gegenüber der Ausscheidung durch Fallout (Trockendeposition von Aerosolen oder Gasen am Boden) vernachlässigbar. 88 % des atmosphärischen Aerosols scheiden sich durch trockene Deposition, 9 % durch Wash-out und 3 % durch Rain-out, d.h. durch Auswaschen innerhalb der Wolken unter Bildung von Kondensationskernen, ab.

Für die nasse Deposition von Partikeln mit Durchmessern kleiner als 10 μm sind nach PORSTENDÖRFER et al. (1979) im Wesentlichen verantwortlich: (1) Konvektive Diffusion bei Partikeln mit Durchmesser kleiner als 0,2 μm , (2) Impaktion bei Partikeln mit Durchmesser größer als 2 μm und (3) Interzeption bei Partikeln mit Durchmesser zwischen 0,5 und 5 μm . Durch nasse Deposition werden die Partikel um PM_{2.5} effektiv der Atmosphäre entzogen (MÖLLER 2003).

In Wäldern mit hohem Fichtenanteil ist mit einem besonders hohen Falloutverlust zu rechnen, da aufgrund des hohen LAI und der starken Abbremsung des Windes eine hohe Ablagerungseffektivität bei gleichzeitig auftretenden niedrigen Windgeschwindigkeiten zu erwarten ist (JONAS 1985).

Die aus den Ablagerungsuntersuchungen abgeleiteten Falloutfaktoren für Waldgebiete zeigen, dass Baumbestände für aerosolförmige Schadstoffe, besonders aber für größere Feinstäube und Grobstäube einen hohen Wirkungsgrad zeigen.

Für Partikel, kleiner als $0,1 \mu\text{m}$ Durchmesser ist die Brownsche Diffusion bestimmend, die auf der ungerichteten Wärmebewegung der Moleküle beruht (MARQUES 1999).

Die Trägheitsabscheidung beruht auf der Tatsache, dass Partikel, die in einer Luftströmung mitgeführt werden, aufgrund ihrer Trägheit Richtungsänderungen bei der Umströmung von Objekten nicht sofort nachvollziehen und sich auf das Hindernis zu bewegen (Abb.5). Ob ein Teilchen auf das Hindernis trifft, hängt im Wesentlichen von seinem Verzögerungsverhalten im Gas ab (DRÖSCHER 1990).

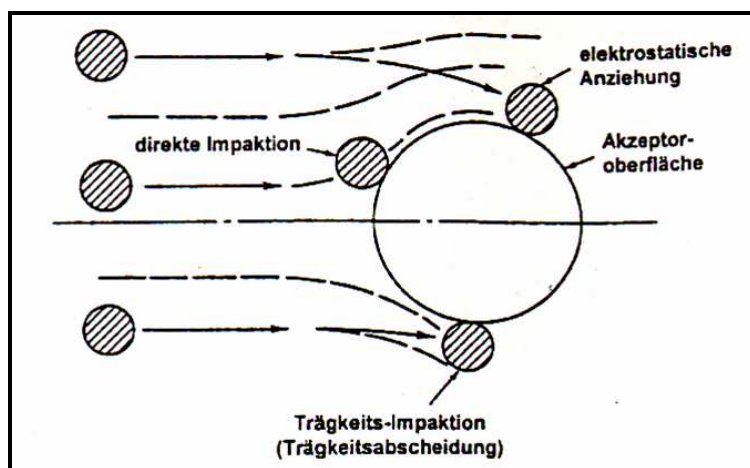


Abb. 5 : Trägheitsabscheidung und elektrostatische Anziehung nach BOUBEL et al. 1994

1.2.3 Gesundheitswirkung von Staub

Partikel befinden sich seit je her in der Luft, die die Menschen einatmen. Diese werden vom menschlichen Organismus durch eine Reihe von Filtermechanismen zu einem großen Teil wieder ausgeschieden. Die Nase filtert vor allem Partikel, die größer als $2,5\ \mu\text{m}$ sind, so dass schon beim Einatmen grobe Partikel abgefangen werden und nicht in die Lungenperipherie gelangen können. Weiter eingedrungene Partikel werden durch normale Reinigungsprozesse (Mucoziliartransport) in den extrathorakalen Atemwegen, Bronchien und Luftröhre an Schleim gebunden und innerhalb weniger Tage (1-3) zum Kehlkopf transportiert und verschluckt (PETERS et al. 2002). Partikel im Größenbereich von $0,3\text{--}5\ \mu\text{m}$ werden zudem sehr erfolgreich phagozytiert. Die Eigenschaft von Partikeln Radikale freizusetzen wurde bei Ratten als ein entscheidender Faktor für die Toxizität der Partikel identifiziert (DYE et al. 1997). Ultrafeine Partikel können von Epithelzellen aufgenommen und ins Bindegewebe transportiert werden (PETERS et al. 1998), als auch im Blut bzw. in weiteren Organen schädlich wirken, in dem sie unter anderem zu Zellmutationen führen (KRZYZANOWSKI et al. 2005).

Untersuchungen von POPE (2000) zeigten Veränderungen in der Gesamtmortalität von Erwachsenen in Städten, die im Zusammenhang mit Partikeln in der Außenluft typischerweise $0,5\text{--}1,5\ \%$ pro $10\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ PM₁₀ und $1\text{--}3\ \%$ pro $10\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ PM_{2.5} erhöht waren.

Die Weltgesundheitsorganisation (WHO) sieht einen gesicherten Zusammenhang zwischen hohen Feinstaubkonzentrationen ($< 2,5\ \mu\text{m}$) und dem deutlich gestiegenen Vorkommen von Bronchitis, Herz-Kreislauferkrankungen, der allgemeinen Verschlechterung der Lungenfunktion und Bronchialkarzinomen. Sie geht bei einem jährlichen Anstieg der PM₁₀ Belastung von 20 auf $30\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ von einer Erhöhung des Sterblichkeitsrisikos von $6\ \%$ aus (WHO 2003, 2004, 2005).

Bei der gesundheitsschädlichen Auswirkung muss man zwischen kurzfristigen und langfristigen Auswirkungen unterscheiden. Der gesundheitliche Schaden von Partikeln hängt mehr von der Größenkonzentration, deren Inhaltstoffen und chemischen Zusammensetzung ab als von der Menge (POPE 2000a).

Letztlich kann kein Schwellenwert für Feinstaub festgelegt werden, unter dem keine gesundheitlichen Auswirkungen zu erwarten sind. Dies untermauert die enorme

Wichtigkeit, die Feinstaubkonzentration in der Luft zu senken und zeigt den großen Handlungsbedarf auf.

Forschungen belegen zudem einen direkten Zusammenhang zwischen der Förderung von Allergien durch verkehrsbedingte Luftverschmutzung und der Nitrierung von Proteinen durch Photooxidantien (FRANZE et al. 2005).

Die natürlich vorkommende Aminosäure Tyrosin wird bei dieser Reaktion in Nitro-Tyrosin konvertiert. Diese veränderten Proteine stehen im Verdacht Allergien auszulösen und zu verstärken, ebenso kann die Intensität von Atemwegs-entzündungen durch Inhalation von Aerosolen erhöht sein (GRUITHUIJSEN et al. 2006).

2 Material und Methoden

2.1 Eingesetzte Stäube

Im Rahmen dieser Arbeit wurden zwei verschiedene Stäube unterschiedlicher Korngrößen und Herkunft eingesetzt.

2.1.1 Feinstaub - Geogener Staub

Es wurde Fimonit der Firma FIM Biotech GmbH eingesetzt.

Das eigenschaftsbestimmende Mineral bei dem Produkt ist ein Muskovit-Montmorillonit-Mixed-Layer-Mineral (75-78%), welches aus tertiärer mariner Genese aus dem Eozän stammt (Tab. 6). Weitere Bestandteile sind Quarz (20%), Feldspat (< 2%) und Siderit/Kalzit (<1%). Fimonit findet als Futtermitteladditiv, Bindemittel als auch Lebensmittelzusatz (E558) Verwendung.

Tab. 6: Chemische Analyse (Masse %) Fimonit (Datenblatt FIM Biotech GmbH)

SiO ₂	59,50
TiO ₂	0,97
Al ₂ O ₃	14,90
Fe ₂ O ₃	6,80
MnO	0,023
CaO	0,46
Na ₂ O	0,80
K ₂ O	1,40
F	< 0,01

Die Partikel des Fimonits zählen zum größten Teil zu den Feinstäuben, die per Definition Partikel mit einem aerodynamischen Durchmesser von 0,5-10 µm enthalten (LAHMANN 1990). Innerhalb der Feinstäube lassen sich Partikel mit einem aerodynamischen Durchmesser < 10 µm (PM10) bzw. 2,5 µm (PM2.5) unterteilen.

Es sind jedoch auch gröbere Partikel (20-250 µm) enthalten, die einen Anteil von 28% ausmachen.

In den folgenden Untersuchungen wurden die Partikel nach ihrer Größe fraktioniert und alle Partikel, die im Mittel einen aerodynamischen Durchmesser kleiner 6,3 µm aufwiesen, wurden in dieser Arbeit unter PM2.5 zusammengefasst.

In Anlehnung daran erfolgte bei allen Bestaubungen mit Fimonit eine Zusammenfassung der Partikel zu PM₁₀, da der überwiegende Anteil von Fimonit Partikel kleiner 10 µm (Tab. 7) beinhaltet.

Tab. 7: Korngrößenverteilung Schlämmanalyse (DIN 18123), Datenblatt FIM Biotech GmbH

Korngröße	Mittelwert Masse[%] Fimonit
< 2,0 µm	Ø 72
2,0-6,3 µm	-
2-20 µm	27
6,3 – 20 µm	-
20- 63µm	Ø 1
63- 250 µm	Ø 0,2

2.1.2 Mittelstaub - Biogener Staub

Als Repräsentant für biogene Stäube wurden Sporen des Keulenbärlapp (*Lycopodium clavatum*) eingesetzt. Der Keulenbärlapp gehört zur Familie der *Lycopodiaceae* (Bärlappgewächse) und kommt in ganz Mittel- und Nordeuropa, Afrika, Asien und Amerika vor. Die Sporen zeichnen sich durch eine kugelige Gestalt aus und besitzen einen Durchmesser von rund 30 µm (Abb. 6), womit die Sporen zu den Mittelstäuben (10-50 µm, nach LAHMANN 1990) zählen. Zudem sind sie äußerst hydrophob und sind demnach nicht mit Wasser benetzbar.

Die Sporen des Keulenbärlapps verpuffen im Feuer sehr gut, so dass sie zum Feuerspucken und in der Pyrotechnik heutzutage Verwendung finden.

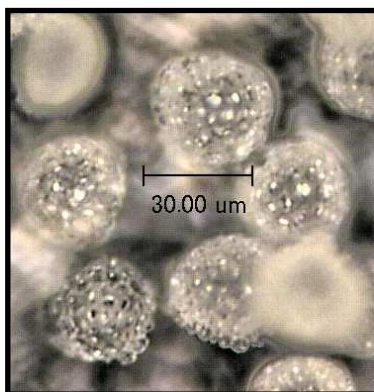


Abb. 6: Sporen von *Lycopodium clavatum*

2.2 Auswahl und Aufbereitung der Pflanzen

Für die Quantifizierungen von Staubauflagerungen auf Pflanzenoberflächen und anschließender Bestimmung des Einflusses von Staubauflagen auf die Photosynthese wurde ein möglichst breites Pflanzenspektrum abgedeckt. Dieses umfasste unter anderem Gehölze, Sträucher, krautige Pflanzen und Gräser, Lianen und Stauden, des Weiteren allgemein beliebte Zierpflanzen.

Die Staubbelastung gerade in Ballungsgebieten ist ganzjährig vorhanden, sodass neben den überwiegend sommergrünen auch immergrüne Arten untersucht wurden, die ganzjährig einen Beitrag zur Staubreduktion leisten können. Da die staubbindende Wirkung von Pflanzen auch im privaten Wohnbereich von Interesse ist, wurden zudem typische Zimmerpflanzen auf ihr Staubfangpotential hin untersucht.

Für alle Versuche wurde frisches und einwandfreies Pflanzenmaterial verwendet. Zudem mussten die Proben trocken sein, d.h. ohne Restfeuchte (Tau, Regen u.ä.) auf den Blattflächen, da Feuchtigkeit das Bindevermögen ändert und damit die Quantifizierung verfälscht hätte.

Es wurden unterschiedliche Individuen einer Art beprobt, um ein möglichst breites Spektrum abzudecken. Dabei war zu beachten, dass man aus Gründen der Vergleichbarkeit adulte, ausdifferenzierte Blätter mit einer ähnlich großen Blattspreite auswählte. Die Probenstandorte befanden sich überwiegend am Campus Essen der Universität Duisburg-Essen, dem Botanischen Garten in Essen und in Nähe der Gladbeckerstraße im Essener Norden. Im Rahmen eines Auslandspraktikums wurden zudem Proben aus der Gegend um Hartoušov in West-Tschechien analysiert. Die Proben wurden alle vor den Experimenten gereinigt, um eventuelle Verschmutzung aufgrund der unterschiedlich belasteten Standorte zu entfernen. Wurden Holzgewächse beprobt, so wurden Blattproben meist aus der Schattenkrone in etwa 2 m Höhe entnommen. Bei Pflanzen aus der Strauchschicht, wurde die Beprobungshöhe entsprechend niedriger bei etwa 1 m angesetzt. Bei Gräsern, Lianen und Stauden schien eine festgelegte Beprobungshöhe nicht sinnvoll.

Die Blattflächen wurden mit VE Wasser abgespült und mit einem weichen Zellstoff leicht abgetupft. Um eine mechanische Zerstörung der Blattmorphologie zu verhindern, durfte nur ein leichter Druck ausgeübt werden. Nachdem die Restfeuchte auf den Blättern entfernt wurde, konnten die Proben für weiterführende Versuche verwendet werden.

An ausgesuchten Spezies wurden zudem die Äste und Zweige verschiedener Jahrgänge auf ihr Feinstaubfangvermögen (PM_{2.5}) untersucht (HASENMÜLLER 2008, PAKLEPPA 2008).

Die Proben wurden aus dem äußeren Kronenrandbereich entnommen. Nach der Ernte der Proben wurden diese mit VE-Wasser abgespült und gereinigt. Nach einer vollständigen Trocknung des Materials wurde es in kleine Segmente (zwischen 1-2 cm) gesägt. Da Zweigstrukturen sehr heterogen sind, war darauf zu achten, möglichst gleich große Proben zu gewinnen, die ähnlich strukturiert waren.

2.3 Quantifizierung von Staubauflagerungen

In Bestäubungsversuchen wurde das maximale Staubfangvermögen von Vegetation unter Laborbedingungen untersucht. Die eingesetzten Stäube unterschieden sich in ihrer Korngrößenverteilung als auch ihrer Herkunft. An ausgesuchten Pflanzen wurden die Blattorgane als auch Zweigstrukturen unterschiedlicher Jahrgänge auf ihre Staubfilterkapazität hin untersucht, wobei die Ablagerungsunterschiede der verschiedenen Partikelgrößen (Mittelstaub, Feinstaub (PM₁₀) als auch lungengängiger Feinstaub (PM_{2.5})) von besonderem Interesse waren.

Der Mittel- und Feinstaubauftrag (PM₁₀) wurde mittels gravimetrischer Methode bestimmt, währenddessen die Feinstaubauflagerung (PM_{2.5}) durch turbidimetrische Trübungsmessung analysiert wurde.

2.3.1 Gravimetrische Bestimmung des Staubauftrages

Die Bestäubung von Pflanzenmaterial und die anschließend gravimetrische Bestimmung des Gewichts sollte Aufschluss über das maximale Staubfangvermögen der verschiedenen Organe geben. Dabei stand der maximal anhaftende Staubauftrag im Vordergrund, unterschieden in Feinstaub- und Mittelstaubfraktionen.

2.3.1.1 Aufbereitung der Proben

Pro Art wurden 25 Blattproben in der Regel von 5 verschiedenen Individuen und Standorten entnommen. Eine permanente Wasserversorgung der Blattorgane war sicherzustellen, um eventuell auftretende Embolien und einen Wasserverlust zu verhindern. Hier erwiesen sich kleine 1,5 ml mit Wasser gefüllte Reaktionsgefäße der Firma Eppendorf als sehr nützlich, in welche die Blattproben unmittelbar nach der Trennung vom Zweig gegeben wurden. Die Proben wurden gewaschen und im Anschluss vorsichtig mit Zellstoff abgetupft. Hierbei war darauf zu achten, die Mikrostruktur und evtl. Behaarung des Blattes nicht zu zerstören.

Von den gereinigten Blattproben wurde kurz vor der Wägung der Blattstiel entfernt und das Frischgewicht mit einer Analysenwaage bestimmt.

Das Pflanzenmaterial wurde in verschließbare, mit *Lycopodium* oder Fimonit gefüllte PE-Boxen gegeben und im Überschuss mit dem jeweiligen Staub bedeckt.

Im Anschluss wurden die Proben mit einer Pinzette aus der Box entfernt, definiert abgeklopft und erneut gewogen. In Vorversuchen wurden sehr stabile und homogene Ergebnisse bei zehnmaligem Abklopfen erzielt, sodass bei allen weiterführenden Bestäubungsversuchen mit Feinstaub als auch Mittelstaub immer gleich verfahren wurde.

Die eingesetzten Stäube Fimonit und *Lycopodium* sind natürliche Substanzen, die nicht toxisch sind, dennoch mussten allgemeine Schutzvorkehrungen getroffen werden, um ein unnötiges Einatmen zu verhindern. Sicheres Arbeiten musste unter einem Abzug und unter Verwendung einer Atemmaske erfolgen, um Gesundheitsschäden vorzubeugen.

Frühere Arbeiten befassten sich mit dem Ablagerungsverhalten und Lösen von *Lycopodium* Sporen auf Pflanzenoberflächen im Windkanal (CHAMBERLAIN 1967, CHAMBERLAIN & CHADWICK 1972, GREGORY 1951). Es zeigte sich dort, dass bei hohen Windgeschwindigkeiten deutlich mehr Sporen auf rauen Oberflächen zurückblieben, als auf sehr glatten Oberflächen. Bei allen Oberflächen gab es einen Schwellenwert, unterhalb dessen keine Sporen abgelöst wurden. Bei rauen Oberflächen betrug dies 1,5 m/s, bei glatten Oberflächen 3,3 m/s. Nach diesen Untersuchungen wurden die Sporen auch bei einem Sturm nur vernachlässigbar gelöst. Selbst bei einem Hurrikan wurden nur 28-63 % der Sporen entfernt (SMITH 1990). Ähnliche Ergebnisse erzielte WEDDING (1977), der in Windkanalversuchen nur vernachlässigbare Abtragungen durch Wind (Messungen bis 7 m/s) auf Pflanzenproben feststellte. GREGORY (1951) fand heraus, dass bei einer Windgeschwindigkeit über 6 m/s die Effektivität der Impaktion deutlich sank.

Die eingesetzte Abklopfmethode bedingte ein sehr kräftiges mehrmaliges Abklopfen der im Überschuss bestaubten Organe, was zwar keiner bestimmten Windgeschwindigkeit zuzuordnen war, jedoch einer starken Windböe, die ein Blatt erreicht, nahe kam. Eine konstante Windgeschwindigkeit kommt unter natürlichen Bedingungen so gut wie nicht vor, viel häufiger sind Verwirbelungen und Böen, die das Blattwerk erreichen. Letztlich wurde mit Hilfe dieser Methode versucht, die natürliche Retention der Sporen als auch des Feinstaubes unter natürlichen Bedingungen zu imitieren. Nur die Partikel sollten gravimetrisch und turbidimetrisch erfasst werden, die auch nach Bewindung haften blieben.

Um Differenzen des Staubfangvermögens aufgrund der morphologischen Unterschiede von Blattober- und Blattunterseiten zu untersuchen, wurden diese im ersten Schritt getrennt voneinander bestaubt. Im weiteren Verlauf der Bestäubungs-

versuche erfolgten ganzheitliche Bestäubungen der gesamten Blattfläche, jedoch weiterhin ohne Blattstiel.

Bei der gravimetrischen Methode musste auf eine ausreichende Menge an Material geachtet werden. Das Eigengewicht der Blattproben und des Staubauftrages musste ausreichend hoch sein, um reproduzierbare Ergebnisse zu erzielen, da mit einer Analysenwaage allgemein eine Bestimmung erst im Milligrammbereich möglich ist. Bei zu leichten Proben bewährte es sich mehrere Einzelblätter zusammenzufassen und gemeinsam zu wiegen.

Im Anschluss an die Wägung erfolgte die Flächenbestimmung der Proben mit Hilfe des LI-3100C Areameter (Firma LICOR), wobei das arithmetische Mittel von drei Werten ermittelt wurde. Schließlich wurde die maximal anhaftende Staubmenge pro Quadratzentimeter Blattfläche berechnet.

Um der Frage nachzugehen, ob ein eventueller Wasserverlust während der Wägung eine ernstzunehmende Beeinflussung auf das Ergebnis ausübte, wurden Blätter verschiedener Arten gewogen und der Wasserverlust pro Zeitintervall (min) bestimmt. Die eigentliche Bestäubung der Blattproben als auch deren erneute Wägung dauerte nie länger als 1,5 min, d.h. für die gravimetrische Bestimmung war ein messbarer Wasserverlust nur in einem Zeitraum von maximal 2 min von Bedeutung.

Wie sich herausstellte, betrug der Wasserverlust in der Regel maximal 0,03 %, womit dieser außer Acht gelassen werden konnte. Ein Beispiel für den gewogenen Gewichtsverlust, der dem Wasserverlust entspricht, ist Tabelle 8 zu entnehmen.

Tab. 8: Gravimetrisch bestimmter Wasserverlust der Blätter (n=10) von *Ficus benjamini*

Frischgewicht [mg]	Gewicht nach 2 min [mg]	Wasserverlust [%]
648,7	648,6	0,02
581,8	581,6	0,03
641,5	641,3	0,03
645,8	645,7	0,02
612,1	612	0,02
643,8	643,7	0,02
648,7	648,6	0,02
634,6	634,4	0,03
641,6	641,4	0,03
645,9	645,7	0,03

Bei den im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Pflanzen konnte keine Verfälschung der Wägung durch einen Wasserverlust festgestellt werden. Bei sehr weichen und

dünnen Blättern ist ein messbarer Wasserverlust durchaus denkbar und sollte sicherheitshalber immer bestimmt werden, um Messfehler auszuschließen.

2.3.2 Turbidimetrische Trübungsmessung

Das anorganische Gesteinspulver Fimonit lässt sich innerhalb der Feinstaubfraktion in Partikel PM10 und PM2.5 (siehe Kap. 2.1.1) differenzieren. Mit Hilfe der Turbidimetrie kann man diese Fraktionen trennen, eichen und Feinstaubfraktionen auf Blattorganen quantifizieren. Dadurch besteht die Möglichkeit auch dreidimensionale Pflanzenorgane, wie Zweige und Äste, zu untersuchen, die mit rein gravimetrischen Methoden bislang nicht erfasst werden konnten.

Die grundlegende Idee von Hasenmüller (2008) wurde für die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Versuche modifiziert und im Folgenden näher erläutert.

2.3.2.1 Funktionsprinzip des Spektrophotometer

Mit Hilfe des Spektrophotometers (Shimadzu UV 160) ist es möglich Trübungsmessungen vorzunehmen.

Materie absorbiert Strahlung unterschiedlich. Das zugrunde liegende Gesetz von Lambert-Beer beschreibt, wie ein Strahlungsstrom in einem absorbierenden Medium abgeschwächt wird:

$$J = J_0 \times \text{EXP}(-t \times I) \quad (\text{Gl. 1})$$

J = Strahlungsstrom nach Durchtritt des Mediums (Transmission)

J₀ = Strahlungsstrom vor Eintritt in das Medium

t = Extinktionskoeffizient

I = Weg durch das Medium

Durch die Wahl der Messwellenlänge im roten Bereich (700nm) wurde die quantitative Bestimmung einer unbekannten Analytkonzentration entsprechend des Lambert-Beer'schen Gesetzes mit Hilfe einer Kalibrationsfunktion (Eichkurve) möglich.

2.3.2.2 *Eichkurve*

Für die Quantifizierung des Staubauftrages wurde eine Eichkurve erstellt. Aus einer Stammlösung (8mg Fimonit/100ml VE-Wasser) wurden Verdünnungsreihen angesetzt. Insgesamt wurden die Ansätze zehn Mal wiederholt und anschließend gemittelt. Die einzelnen Massenkonzentrationen sind Tabelle 9 zu entnehmen.

Die Erstellung der Eichkurve erfolgte in Anlehnung an die Methodik von HASENMÜLLER (2008).

Tab. 9: Massenkonzentrationen und gemessene Mittelwerte und SD der Transmission [%] der Eichkurve

Massenkonzentration [mg/ml]	Transmission [%]	SD
0,288	63,74	1,54
0,144	75,48	1,48
0,072	86,82	0,73
0,036	91,35	0,95
0,018	93,47	1,61
0,009	95,57	0,77

Die Suspensionen wurden für die spätere Transmissionsmessung im Spektrometer in Reagenzgläser überführt. Die Staubfraktionen des Fimonit mussten getrennt werden, da für die turbidimetrische Bestimmung ausschließlich die Feinstaubfraktionen PM_{2.5} von Interesse waren. Dies geschah durch eine ausreichende Sedimentationszeit von 60 min (Tab. 10), in der alle schwereren Partikel absanken und lediglich die Feinstaubfraktion ($\leq 2 \mu\text{m}$) durch Abpipettieren des Überstandes analysiert werden konnten.

Tab. 10: Sedimentationsgeschwindigkeit für 10 cm Sinkstrecke in Wasser bei 20°C (HARTGE 1999)

Teilchendurchmesser [μm]	Sedimentationszeit für 10 cm
< 2	> 7h 40min
2 – 6,3	7h 40 min – 50min
6,3 – 20	50min – 4min 3s
20 – 63	4min 30s – 30s
63 – 200	30s – 3 s

Jeweils 1 ml der gelösten Suspensionen wurden in Einmalküvetten überführt und unmittelbar im Anschluss bei 700 nm (Rotlichtbereich) die Transmission [%] bestimmt. Eine homogene Verteilung musste sichergestellt sein. Nach Bedarf schüttelte man die Probe vor dem Einsetzen in den Lichtstrahl.

In Vorversuchen über das gesamte Lichtspektrum zeigte sich, dass bei 700 nm das stabilste Ergebnis erzielt werden konnte (HASENMÜLLER 2008).

Da Fimonit unter anderem auch zur Konditionierung von Gülle Verwendung findet, musste sichergestellt werden, dass die Suspension innerhalb der Sedimentationszeit von einer Stunde nicht aufquoll. Eine Quellung hätte eine Vergrößerung der Partikel und damit eine Verfälschung der Ergebnisse bedeutet. Der Lichtstrahl wäre an den größer gewordenen Partikeln abgelenkt worden und hätte eine niedrigere Transmission suggeriert, die einen Konzentrationsanstieg zur Folge gehabt hätte.

Laut Herstellerangaben (mündliche Mitteilung) sei dies jedoch innerhalb dieser kurzen Zeit (max. 1,5 h Quellzeit) auszuschließen.

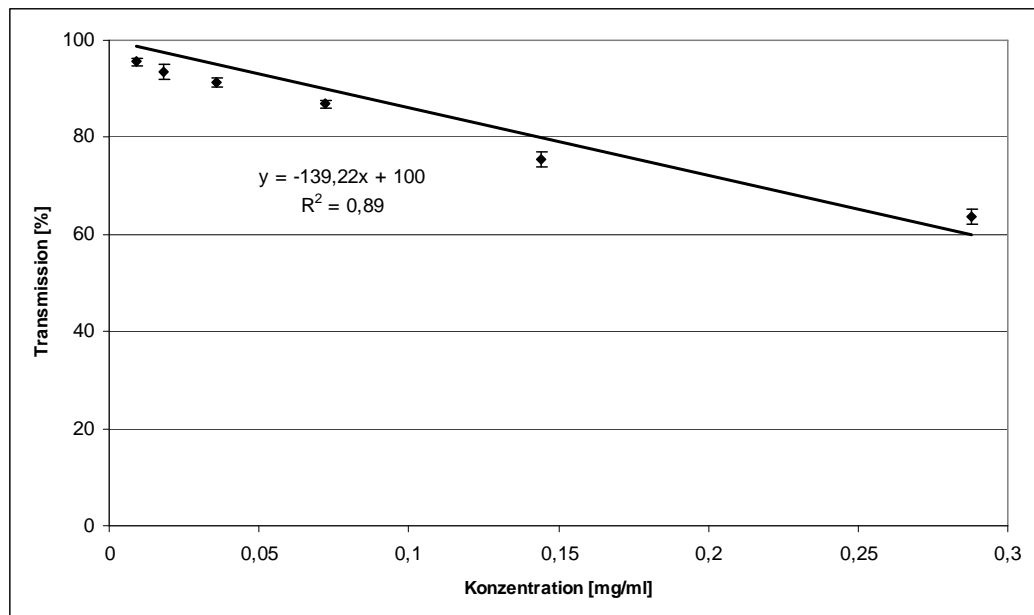


Abb. 7: Eichkurve Fimonit, $n=10$, dargestellt ist der Mittelwert und SD mit linearer Trendlinie, Geradengleichung und Bestimmtheitsmaß

In Abbildung 7 kann der lineare Zusammenhang zwischen Konzentration und Transmission abgelesen werden. Anhand der linearen Gleichung konnte so einer beliebig gemessenen Transmission die dementsprechende Konzentration zugeordnet werden. Auf eine ausreichende Verdünnung der Proben war zu achten. Ein besonders stabiles und reproduzierbares Ergebnis wurde im Transmissionsbereich von 60-95 % erreicht.

Nach der turbidimetrischen Bestimmung der Transmission von allen Proben waren einige Umrechnungen erforderlich.

Um von der gemessenen Transmission [%] eine Mengenangabe in mg/ml geben zu können, wurde in folgende Formel (aus Eichung) eingesetzt:

$$(\text{gemessene Transmission} - 100) / -139,22 \quad (\text{Gl. 2})$$

Diese Angaben mussten dann mit der eingesetzten Menge an VE-Wasser in ml multipliziert und auf die Blattfläche bezogen werden, um abschließend den Feinstaubauftrag (PM2.5) in mg/cm² angeben zu können.

2.3.2.3 *Aufbereitung der Proben*

2.3.2.3.1. Blattorgane

Die Proben wurden wie im Kapitel 2.3.1 beschrieben aufbereitet. Nachdem auf gravimetrischem Weg das Staubfangvermögen der Feinstaubanteile (PM10) von Fimonit bestimmt wurde, erfolgte im Anschluss daran die turbidimetrische Bestimmung des maximalen Feinstaubauftrages (PM2.5) auf Blättern. Dazu wurden die bestaubten und gewogenen Blattproben vorsichtig in Probenbehälter aus PE überführt. Abhängig von Größe und Staubfangvermögen der einzelnen Blätter wurden unterschiedliche Mengen VE-Wasser in die Beutel gefüllt und ausgiebig durchmischt bis sich eine homogene Suspension ergab. Die Suspension sollte optisch nur schwach verfärbt sein, ansonsten musste weiterhin verdünnt werden. Für die anschließende Messung der Transmission musste der Probeninhalt nahezu durchsichtig sein, um Transmissionswerte im gewünschten gesicherten Bereich von 60-95 % zu erzielen. Diese Mischung wurde in Reagenzgläser überführt und wie unter Kap. 2.3.2.2 erläutert aufbereitet.

Pro Pflanzenart wurden 25 Ansätze durchgeführt.

2.3.2.3.2 Zweige/ Äste

Die Proben wurden mit zwei Nadeln an den Schnittflächen fixiert, im Überschuss mit Staub bedeckt und definiert abgeklopft. Die feuchten Schnittflächen verfälschen das eigentliche Staubfangvermögen der Borke oder des Periderms. Daher musste diese Fläche gereinigt werden. Sehr zufrieden stellende Ergebnisse wurden durch das Abstreifen der Fläche mit einer Rasierklinge erzielt (PAKLEPPA 2008). Nach dem Aufbereiten der Proben überführte man sie in Reagenzgläser und fügte definierte Mengen an VE-Wasser hinzu, um anschließend die Trübungsmessung mit dem Spektroradiometer durchführen zu können. Bei der Berechnung der Probenfläche wurde von einem zylindrischen Körper ausgegangen, so dass mittels der folgenden Formel die Fläche bestimmt wurde:

$$A = \pi * d * h \quad \text{(Gl. 3)}$$

wobei

d = Zweigbreite

h = Zweigstücklänge

Es erfolgte auch hier eine Umrechnung, um den maximalen, flächenbezogenen Staubauftrag in mg/cm² angeben zu können.

2.4 Chlorophyllfluoreszenzanalyse

Die Chlorophyllfluoreszenzanalyse wurde in der vorliegenden Arbeit als geeignete Methode gewählt, um eine eventuelle Beeinträchtigung der Photochemie durch Staubauftrag auf Blättern zu erkennen und visuell sichtbar zu machen. Im Folgenden werden die theoretischen Grundlagen zu dieser Methode näher erläutert.

2.4.1 Chlorophyllfluoreszenz

Innerhalb von pflanzlichen Zellen erfolgt die Photosynthese in speziellen Assimilationsgeweben, den Chloroplasten, wo mit Hilfe von Licht, CO₂ und Wasser organische Substanzen in Form von Kohlenhydraten aufgebaut werden.

Die photochemische Umwandlung findet in den Thylakoiden statt, wobei die lichtabhängige Bereitstellung der Reduktionsäquivalente (Lichtreaktion) in und an den Thylakoidmembranen durch die Photosysteme I und II erfolgt, währenddessen Kohlenstoff im Calvin-Zyklus über verschiedene Enzymsysteme (Dunkelreaktion) im Stroma assimiliert wird.

Chlorophyll absorbiert Lichtquanten, bevorzugt rotes (659-720nm, Maxima bei 680 nm) und blaues (420-490 nm, Maxima bei 450 nm) Licht, wobei ein angeregter Zustand entsteht, der äußerst instabil ist und innerhalb von 10^{-12} s (PELLEGRINO & ALFANO 1982) unter Energieabgabe in den Grundzustand überführt wird.

Für ein Exziton gibt es verschiedene Möglichkeiten, von dem S₁- in den S₀- Zustand zu gelangen.

Im Einzelnen sind dies:

- Fluoreszenz (F) durch Emission
- Strahlungslose Abgabe der Energie als Wärme; thermische Deaktivierung (D), „non-photochemical quenching“
- Übertragung der Anregungsenergie an das Reaktionszentrum des Photosystems; Photochemie (P), „photochemical quenching“

Da die Raten der drei Reaktionswege komplementär voneinander abhängen, kann folgender Grundsatz aufgestellt werden (SCHREIBER 1997):

$$P \text{ (Photochemie)} + F \text{ (Fluoreszenz)} + D \text{ (Wärme)} = 1 \quad (\text{Gl. 4})$$

bzw.

$$(F) \text{ Fluoreszenz} = 1 - P \text{ (Photochemie)} - D \text{ (Wärme)} \quad (\text{Gl. 5})$$

Unter normaler Zimmer- bzw. Labortemperatur kann man davon ausgehen, dass die variable Fluoreszenz vom PS II stammt (BAKER & WEBBER 1987). Das PS I emittiert vorwiegend bei 735 nm Fluoreszenzlicht, bei 683 nm das PS II.

Bei intakten, photosynthetisch aktiven Blättern werden etwa 3-7% des Lichtes über Fluoreszenz abgegeben.

Mittels der Chlorophyllfluoreszenz kann man sich diese Eigenschaft praktisch zunutze machen, um eine Aussage über die Photochemie zu treffen. Da Licht- und Dunkelreaktion miteinander gekoppelt sind, lassen sich eine Reihe von Informationen über verschiedene Vorgänge der Photosynthese gewinnen, u.a. die Lichtabsorption in den Antennenpigmenten der Lichtsammelkomplexe (LHC) und die Energieübertragung zu den Photosystemen als auch der Elektronentransport über membran-gebundene Komponenten der Elektronentransportkette.

Insbesondere lässt sich die Stressphysiologie der Pflanzen anhand des Zustands des PS II analysieren (VON WILLERT et al. 1995). Störungen der Photosynthese, vor allem des Elektronentransportes, können sich als Verstärkung der Fluoreszenz äußern und eventuell dadurch quantifiziert werden.

Wird ein dunkeladaptiertes Blatt belichtet, so läuft das komplexe Enzymsystem der Photosynthese nicht sofort an. Es benötigt bei einem intakten Blatt etwa drei Minuten Zeit, ehe die einzelnen Abläufe synchron arbeiten. Anfänglich kommt es zu einem Energiestau, so dass es zu einer verstärkten Abgabe der Energie als Fluoreszenz kommt. Ist das System angelaufen sinkt die Chlorophyll-a-Fluoreszenz auf einen Bruchteil ihres Ausgangswertes. Der reziproke Zusammenhang zwischen Chlorophyllfluoreszenz und Photosynthese wurde von Kautsky erkannt und wird Induktionskinetik oder Kautsky-Effekt genannt. Ändert sich der Verlauf der Fluoreszenzintensität während des Anlaufens der Lichtreaktion, so lassen sich daran Informationen über die Photosyntheseaktivität ableiten.

2.4.2 Funktionsprinzip und Messinstrumente

Um Veränderungen der Quantenausbeute der Energieumwandlung im PSII visuell darzustellen, wurde das Imaging-PAM Fluorometer der Firma Walz GmbH, Effeltrich, Deutschland verwendet.

Mittels sättigender Lichtblitze kann auf nicht invasivem Weg die Quantenausbeute des PSII ermittelt werden (SCHREIBER et al. 1994). Für die aktinische Ausleuchtung und die sättigenden Lichtblitze wird bei der Imaging-PAM blaues Licht der Wellenlänge 470 nm verwendet. Durch hochspezialisierte Pulsverstärker wird gewährleistet, dass die Fluoreszenz nicht von überlagernden Lichtsignalen gestört wird. Eine PIN-Photodiode detektiert die gesendeten linearen Signale.

Die Absorption von Pflanzenmaterial wird im roten (RED) und Nahen Infrarotbereich (NIR) erfasst, woraus sich über die Beziehung $\text{Absorption} = 1 - \text{RED}/\text{NIR}$ ein Absorptionskoeffizient errechnen lässt. Der Absorptionskoeffizient wird zwischen 0 und 1 angegeben, was einer Absorption zwischen 0 und 100 % entspricht.

2.4.3 Wichtige Fluoreszenzparameter

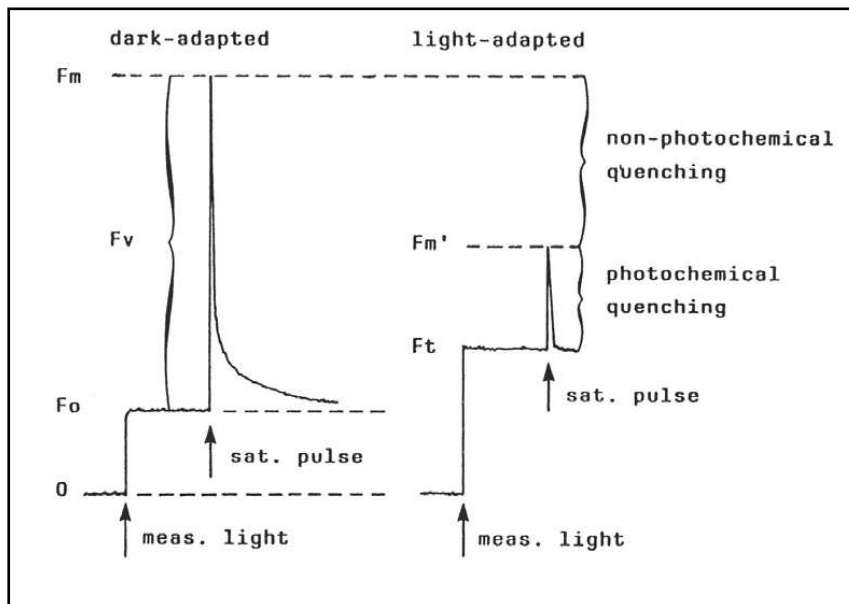


Abb.8: Darstellung der wichtigsten Fluoreszenzparameter zur Bestimmung der PSII Quantenausbeute bei Verwendung des PAM-Fluorometers (SCHREIBER et al. 1994)

2.4.3.1 *Dunkeladaptierte Proben*

Ohne Belichtung (Verdunklungsphase) liegen die Reaktionszentren und die Moleküle der Elektronentransportkette im oxidierten (offenen) Zustand vor.

Wichtige Fluoreszenzparameter hierbei sind (Abb. 8):

F _o	minimale Fluoreszenzausbeute; Grundfluoreszenz
F _m	maximale Fluoreszenzausbeute; durch einen Sättigungsimpuls wird die Elektronentransportkette kurzzeitig vollständig gesättigt (reduziert)
F _v	variable Fluoreszenz: $F_v = F_m - F_o$
F _v /F _m	maximale Quantenausbeute von PSII ; Maß für die Effizienz mit der Anregungsenergie aus den Antennenkomplexen von offenen Reaktionszentren im PSII übernommen wird; $F_v/F_m: (F_m - F_o)/F_m$

2.4.3.2 *Lichtadaptierte Proben*

Werden photosynthetisch aktive Gewebe beleuchtet (Tageslicht oder definierte Lichtintensitäten unter Laborbedingungen), so ist die maximale Fluoreszenzausbeute (F_m') durch die thermische Deaktivierung (Wärme) reduziert.

Wichtige Fluoreszenzparameter hierbei sind (Abb. 8):

F _m '	maximale Fluoreszenzausbeute einer belichteten Probe
F _t	momentaner Messwert der Fluoreszenzausbeute
ΔF/F _m '	Yield; effektive Quantenausbeute von PSII einer belichteten Probe; $(F_m' - F_t)/F_m'$. Die Abstrahlung in Form von Wärme als auch die zum Teil geschlossenen Reaktionszentren bedingen eine Reduktion der Quantenausbeute gegenüber der maximalen Quantenausbeute von dunkeladaptierten Proben.
ETR	Elektronentransportrate

Sind die effektive Quantenausbeute von PSII und die Quantenflussdichte (PFD) bekannt, kann die Elektronentransportrate (ETR) mittels folgender Formel berechnet werden (SCHREIBER 1994, 2001):

$$ETR = \Delta F/F_m' \text{ (Yield)} * PFD * 0,5 * Abs \quad (Gl.6)$$

Dabei wird die Absorption individuell von der Imaging-PAM gemessen und verrechnet. Für die Verteilung der Quanten auf PSI und PSII nimmt man eine Verteilung von 50/50 an (SCHREIBER 2001), was sich in der Formel als 0,5 wiederfindet.

2.4.4 Versuchsaufbau

Blätter verschiedener Arten wurden im Überschuss mit Stäuben versetzt und anschließend ebenso wie bei den Bestäubungsversuchen definiert abgeklopft. Unbestäubte Blätter dienten als Kontrolle, wobei die Ober- und Unterseiten getrennt voneinander gemessen wurden. Die Blätter wurden in die Apparaturen der jeweiligen PAM eingespannt und 5 min abgedunkelt (Abb.9). Während der Chlorophyllfluoreszenzmessung wurde eine ausreichende Wasserversorgung der Blätter sichergestellt.

Mit der Imaging-PAM wurden Lichtkurven mit den folgenden Lichtintensitäten gefahren: 1 – 5 – 41 – 91 – 136 – 226 – 291 – 366 PAR [$\mu\text{mol Photonen/m}^2\text{s}$], während dessen die Lichtintensitäten bei der Teaching-PAM (PAM 210) technisch bedingt festgelegt wurden auf:

0 – 46 – 90 – 126 – 218 – 286 – 382 PAR [$\mu\text{mol Photonen/m}^2\text{s}$].

In weiteren Experimenten wurde bei einer festgelegten Lichtintensität von 366 $\mu\text{mol Photonen/m}^2\text{s}$ gemessen. Die Einstellung der Lichtintensitäten erfolgte über vorgegebene Lichtstufen, so dass die Lichtintensität technisch bedingt festgelegt war und einer mittleren Strahlungsintensität entsprach. Die Messdauer der einzelnen Lichtstufen betrug 3 min.



Abb. 9: Versuchsaufbau Imaging-PAM mit eingespannter Blattprobe vor Verdunkelung

2.4.5 Vergleich Imaging-PAM / Teaching-PAM

Die Grundlage beider Geräte ist die Chlorophyllfluoreszenz, wobei die Imaging-PAM mit blauem Licht anregt, währenddessen die Anregung bei der Teaching-PAM im roten Wellenlängenbereich erfolgt.

Mit Hilfe der PAM Fluorometer wurden Lichtkurven von bestaubten Blättern als auch unbestaubten Kontrollblättern gefahren, um einen eventuellen Einfluss auf die primäre Lichtreaktion anhand der gängigen Parameter zu bestimmen. Basierend auf der gleichen Methode wurden beide Geräte auf ihre Anwendbarkeit in Bezug auf die Bestäubungsversuche verglichen.

Die Imaging-PAM zeichnet sich durch ihre bildgebenden Qualitäten aus.

Ebenso kann durch die individuelle festlegbare Fläche (AOI= Area of interest) ein viel größerer Blattbereich mit einer Messung abgedeckt werden.

Aufgrund der sehr kleinen Messfläche bei der Teaching-PAM wurden zum Teil widersprüchliche als auch zu heterogene Ergebnisse erzielt (Tab. 11). Bei *Crataegus crus-galli* beispielsweise wurde bei Messung mit der Teaching-PAM eine Steigerung der ETR unter Bestäubung gemessen, währenddessen der negative Einfluss des Staubes bei Messung mit der Imaging-PAM festgestellt wurde.

Die Morphologie und das Mikrorelief von Blättern sind entscheidend für das Staubfangvermögen. Die sehr kleinen getesteten Bereiche ließen auch bei mehrfacher Wiederholung keinen eindeutigen Rückschluss auf den Einfluss der Staubauflage zu.

Bei der Teaching-PAM wurden die Proben zudem mit Hilfe eines Magneten auf der Lichtquelle und dem Detektor fixiert. Die Blattproben wurden im Überschuss bestaubt und im Anschluss definiert (10x) abgeklopft, bis visuell sichtbar kein Staub mehr abfiel. Somit sollte das maximale Staubfangvermögen bestimmt werden. Durch die relativ starke Fixierung ist es denkbar, dass sich dennoch Partikel gelöst haben und sich zum einen auf die Lichtquelle gelegt haben, zum anderen das Ergebnis verfälscht haben. Möchte man den natürlichen Einfall des Lichtes auf ein Blatt imitieren ist es erforderlich, die Blattproben mit der Blattoberseite nach unten zu inserieren, da die Lichtquelle im Gerät so lokalisiert ist, dass das rote Licht von unten auf die Proben emittiert wird. Auch hier sind mögliche Fehlerquellen zu sehen. Denkbar ist auch hier, dass durch das Umdrehen und Fixieren der bestaubten Blattprobe feine Partikel gelöst wurden.

Tab. 11: Vergleichende Ergebnisse zwischen Imaging-PAM und Teaching-PAM. Es wurden je 6 unbestäubte und 6 bestäubte Blattproben vermessen, jeweils die Blattoberseite (oben), n=6 und Blattunterseite (unten), n=6. Dargestellt ist der Einfluss der Staubauflagerung auf die Elektronentransportrate [ETR], errechnet mit $\text{ETR}_{\text{unbestäubt}} - \text{ETR}_{\text{bestäubt}}$
 + = ETR steigt; - = ETR sinkt; 0= keinen Einfluss.

	Imaging-PAM		Teaching-PAM	
	oben	unten	oben	unten
<i>Acer platanooides</i>	-	-	0	0
<i>Amelanchier lamarckii</i>	+	0	+	0
<i>Betula pendula</i>	+	+	0	0
<i>Buddleja davidii</i>	+	0	0	0
<i>Crataegus crus-galli</i>	-	0	+	+
<i>Fraxinus excelsior</i>	-	-	0	0
<i>Platanus x hispanica</i>	-	-	0	0
<i>Quercus rubra</i>	-	-	0	0
<i>Quercus robur</i>	-	-	0	+
<i>Sambucus nigra</i>	-	0	0	0
<i>Viburnum lantana</i>	-	-	0	0

Ein maßgeblicher Vorteil der Imaging-PAM ist die individuelle Messung der Absorption. Während bei der Teaching-PAM ein festgelegter Absorptionskoeffizient von 0,84 (d.h. im Mittel werden 84% der Strahlung absorbiert) zur Berechnung der ETR zugrunde gelegt wird, wird bei der Imaging-PAM die Absorption individuell berechnet und anschließend verrechnet.

Aufgrund der aufgeführten Vorteile wurde für weiterführende Untersuchungen an Blättern die Imaging-PAM verwendet.

2.5 Spektroradiometrische Messung der Transmission

Die potentiell schädigende Wirkung einer artifiziell auf Blätter aufgetragenen Staubschicht sollte untersucht werden. Blattober- als auch Blattunterseiten verschiedener Pflanzenarten wurden hinsichtlich ihrer spektralen und optischen Eigenschaften analysiert.

Eingesetzt wurde das Spektroradiometer der Firma Ocean Optics mit dem dazugehörigen Computerprogramm Spectra Suite und der Quelle HR4C1444 (Type HR4000). Hierbei erhielt man neben einer Vielzahl weiterer Strahlungsparameter die Transmission bei unterschiedlichen Wellenlängen zwischen einem Bereich von etwa 200-1000 nm. Im Rahmen dieser Untersuchungen war nur die photosynthetisch aktive Strahlung (PhAR) von 380-720 nm von Bedeutung.

Das Gerät musste vor jeder Messung kalibriert werden. Der Anwender musste eine Referenz als auch Dunkelmessung durchführen, um die zu erwartende Transmission gegen diese Werte zu korrigieren. Das Licht von der Lichtquelle wurde über eine optische Faser unter der Blattprobe übermittelt. Die Interaktionen zwischen Licht und Blattprobe wurde an das Spektroradiometer weitergeleitet. Das Spektroradiometer maß die dort ankommende Menge an Licht und wandelte die Daten in digitale Informationen um. Die OOI Software verglich die Probe mit den Referenzmessungen und verarbeitete diese in spektrale Informationen.

2.5.1 Transmissionssmessung an Blattflächen

Transmissionsspektren von Kontrollblättern (n=10) als auch im Überschuss zum einen mit Mittelstaub als auch Feinstaub bestaubter Blätter (n=10) wurden aufgenommen. Hierbei sollte festgestellt werden, in wie weit ein Staubauftrag die Lichtverhältnisse im Blatt ändert. Um eine Vergleichbarkeit zu gewährleisten, wurden jeweils die gleichen Flächen der Blattproben gewählt. Die Blattproben wurden wie im Kapitel 2.3.1.1 behandelt.

Die Blattproben wurden auf eine schwarze Plastikplatte gespannt, in der durch eine kreisrunde Öffnung exakt die Messfaser von unten durchgeführt und fixiert vorlag.

Um Verfälschungen der Ergebnisse durch Streulicht zu vermeiden, wurden die Messungen in einem Dunkellabor durchgeführt. Die eingesetzte Kaltlichtlampe der Firma Schott (KL1500 electronic) wurde exakt über der Messfaser positioniert, sodass ein senkrecht zur Blattprobe verlaufender Strahlengang gewährleistet war.

Die auf die Pflanzenproben gegebenen Lichtintensitäten betrugen zwischen 950-1000 $\mu\text{mol Photonen/m}^2\text{s}$, die mit Hilfe des Lichtmessgerätes LI250 der Firma LICOR (LICOR Inc. Lincoln, Nebraska, USA) bestimmt wurden.

Durch einfache Subtraktion der gemessenen Transmission eines bestaubten Blattes von der gemessenen Transmission eines Kontrollblattes konnte zum einen die direkte Reduktion der Transmission in Prozent berechnet werden. Zum anderen war es möglich den Einfluss, differenziert nach definierten Wellenlängenbereichen, zu bestimmen. Dabei wurden relative als auch durch Umrechnung in PAR [$\mu\text{mol Photonen/m}^2\text{s}$] absolute Transmissionsmessungen durchgeführt.

Die PFD-Transmission wurde im sichtbaren Bereich von 380-720 nm aufgenommen. Der Bereich zwischen ca. 350-400 nm war aufgrund der technischen Gegebenheiten der eingesetzten Lichtquelle Schwankungen unterlegen, sodass die Ergebnisse in diesem Bereich nur bedingt interpretiert werden konnten.

In diesem Versuch konnte der Einfluss einer maximal auf einer Blattfläche anhaftenden Staubschicht auf die Lichtverhältnisse bestimmt werden.

2.5.2 Transmissionsmessung von Staubschichten unterschiedlicher Mächtigkeit

In einem weiteren Versuch sollte ein allgemeiner Zusammenhang zwischen Staubmächtigkeit und verminderter Transmission untersucht werden.

Eine dünne Glasplatte diente hierbei als Unterlage, bei der die Transmission nahezu 100% betrug. Auf dieser wurde ein Gummiring mit der Fläche von 0,196 cm^2 fixiert, in den definierte Mengen Mittelstaub- als auch Feinstaub gleichmäßig verteilt hinzugefügt wurden. Von den unterschiedlichen Mächtigkeiten der Staubauflage wurde im Anschluss die Transmission vermessen.

2.6 Statistische Auswertung

Die Signifikanz der Unterschiede von verschiedenen zu vergleichenden Datensätzen wurde mittels eines Student'schen t-Tests geprüft. Als Ergebnis eines t-Tests wird ein P-Wert angegeben. Dieser P-Wert gibt die Irrtumswahrscheinlichkeit für die Richtigkeit der Hypothese an, dass die jeweils verglichenen Gruppen keiner gemeinsamen Grundgesamtheit angehören. Nach SACHS (1995) wird die Signifikanz wie folgt bewertet:

- $P > 0,05$: nicht signifikant (ns)
- $0,05 > P > 0,01$: signifikant (*)
- $0,01 > P > 0,001$: hoch signifikant (**)
- $P < 0,001$: höchst signifikant (***)

Um die Korrelation zwischen zwei Datensätzen zu prüfen, wurde auf die Bestimmung des Pearson'schen Korrelationskoeffizienten (R) zurückgegriffen. Dieser Koeffizient ist ein dimensionsloser Index mit dem Wertebereich $-1,0 \leq R \leq 1,0$. Je näher der R -Wert bei 1 liegt, desto höher ist die Korrelation bzw. die lineare Abhängigkeit der zu vergleichenden Datensätze. Analog dazu stellt das Quadrat des Pearson'schen Korrelationskoeffizienten (R^2) das Bestimmtheitsmaß einer Kurve dar, welches die Zuverlässigkeit eines Trends angibt; hierbei gilt: je näher R^2 an 1, desto zuverlässiger ist der Trend.

Des Weiteren wurden in dieser Arbeit der Mittelwert (MW) und die Standardabweichung (SD) als deskriptive Statistik verwendet.

2.7 Digitalmikroskopische Aufnahmen

Die Aufnahmen der Pflanzenoberflächen wurden mit dem Digitalmikroskop der Firma Keyence durchgeführt. Die Objektvergrößerungen beziehen sich auf das Ausgabe-medium, einem 15 Zoll Monitor. Zur Größenangabe wurden Skalierungsbalken eingefügt. Des Weiteren wurden mit der Zeiss Axio Cam HRC High End Kamera und dem Stereomikroskop Stemi 200C digital Bilder dokumentiert.

3 Ergebnisse und Diskussion

3.1 Quantifizierung von Staubauflagerungen

3.1.1 Das maximale, flächenbezogene Staubfangvermögen von Assimilationsorganen - differenziert nach Pflanzenart, Pflanzenorgan und Staubfraktion

Die Fähigkeit der Assimilationsorgane, eine bestimmte Staubmenge pro Flächeneinheit unter definierten Bedingungen aufnehmen zu können, bezeichnet man als artspezifisches Staubfangvermögen (ULLRICH 1976).

Im Rahmen dieser Arbeit wurde das Staubfangvermögen verschiedener Pflanzenarten und Pflanzengruppen (Bäume, Sträucher, Lianen, Kräuter, Gräser, Zimmer- und Zierpflanzen), sowie verschiedener Pflanzenorgane mittels gravimetrischer und turbidimetrischer Methoden (Kap. 2.3) quantifiziert und verglichen. Dabei wurde, wie im Folgenden näher beschrieben, klar zwischen den verschiedenen Staubfraktionen (Mittel- und Feinstaub (PM₁₀) und (PM_{2.5})) differenziert.

3.1.1.1 *Das maximale, flächenbezogene Staubfangvermögen von Blättern - differenziert nach Pflanzenart und Staubfraktion*

3.1.1.1.1 Mittelstaub - Biogener Staub

Die meisten Sporen und Pollen haben eine durchschnittliche Größe von 20-40 µm (SMITH 1990) und gehören somit zu Mittelstaubpartikeln biogenen Ursprungs.

Die Sporen von *Lycopodium clavatum* haben eine Größe von 30 µm und wurden im Folgenden für alle Bestäubungsversuche im Mittelstaubbereich eingesetzt.

Die Ergebnisse (Tab.12) zeigten eine große artspezifische Variabilität im flächenbezogenen Mittelstaubfangvermögen. Die Werte der 16 untersuchten Arten lagen zwischen durchschnittlich $0,09 \pm 0,01$ mg/cm² und $1,34 \pm 0,19$ mg/cm².

Tab.12: Das maximale, flächenbezogene Mittelstaubfangvermögen [mg/cm²] von Blättern (Blattober- und -unterseite) diverser Pflanzenspezies. Dargestellt ist der Mittelwert (n=25) mit Standardabweichung (SD), sortiert nach dem maximalen Mittelstaubfangvermögen mit Angaben zur Behaarung.

Wissenschaftlicher Name	Mittelstaub*	SD	Anmerkung Behaarung
<i>Viburnum rhytidophyllum</i>	1,34	0,18	Bündelhaare US dicht, OS locker, 20-40 Haare gebündelt, (1)
<i>Sorbus intermedia</i>	1,01	0,10	Einfachhaare US dicht, OS locker (1)
<i>Ribes sanguineum</i>	0,64	0,05	Einfachhaare OS u US dicht, Köpfchenhaare (Drüsenhaare) (6)
<i>Corylus avellana</i>	0,59	0,05	Einfach- u Köpfchenhaare OS u US locker (1)
<i>Sorbus aucuparia</i>	0,46	0,03	Einfachhaare, OS unbehaart u US locker (1)
<i>Corylus colurna</i>	0,43	0,04	Einfach- u Köpfchenhaare, OS u US locker (1)
<i>Dracaena marginata</i>	0,39	0,03	keine nennenswerte Behaarung (4)
<i>Tilia tomentosa</i>	0,39	0,04	Schildhaare US dicht, OS vereinzelt (1)
<i>Dracaena fragans</i>	0,37	0,02	keine nennenswerte Behaarung (4)
<i>Quercus robur</i>	0,29	0,02	Einfach/ Köpfchen/ Bündelhaare, OS u US locker (1)
<i>Platanus x hispanica</i>	0,26	0,01	Etagenhaare, wenige im juvenilen Stadium (3)
<i>Calathea rufibarba</i>	0,22	0,02	Einfachhaare, OS locker auf Nerven, US dicht (4)
<i>Chamaedorea elegans</i>	0,17	0,03	keine nennenswerte Behaarung (4)
<i>Quercus rubra</i>	0,15	0,01	Einfach- u Bündelhaare OS u US locker (1)
<i>Sambucus nigra</i>	0,13	0,01	keine nennenswerte Behaarung (4)
<i>Fagus sylvatica</i>	0,09	0,01	Einfachhaare OS u US locker (1)

*als Mittelstaubpartikel dienten Sporen von *Lycopodium clavatum* (30 µm); Quellenangaben: (1) WESTERKAMP & DEMMELMEYER 1997, (3) DÜLL & KUTZELNIGG 1994, (4) Flohr, eigene Beobachtung, (6) FROHNE & PFÄNDER 1997, OS = Blattoberseite, US= Blattunterseite

Es zeigte sich, dass die Blattoberflächenbeschaffenheit beim Staubfangvermögen eine entscheidende Rolle spielt (PFANZ & FLOHR 2007). Neben dem Relief sind ebenso Rauigkeit und Nervatur des Blattes von Bedeutung (WESTERKAMP & DEMMELMEYER 1997). Oberflächenladungen und eventuell vorkommende Drüsenhaare, die klebrige Substanzen abgeben, können das Staubfangvermögen ebenso beeinflussen. Sehr hohe Staubmengen auf Blattoberflächen von *Quercus robur* von 12,83 g/m² belegten diesen Zusammenhang, da an diesen Blättern häufig Honigtauauflagerungen zu finden sind, die sehr stark an den Blattflächen haften und Schmutzpartikel einschließen (HELBING 1973). Ohne diese Auflagerungen hielten sich deutlich weniger Partikel (Mittelstaub) auf den Blattflächen vom *Quercus robur* von nur 0,29 mg/cm² (Tab.12).

Das höchste mittlere Fangvermögen für Mittelstaub zeigten die Arten *Viburnum rhytidophyllum* und *Sorbus intermedia*, die Werte über 1 mg/cm² erzielten.

Die niedrigsten Werte wurden von *Sambucus nigra* und *Fagus sylvatica* erzielt (Tab. 12). Eine mögliche Erklärung für diese gravierenden artspezifischen Unterschiede offenbarte sich bereits bei einem Vergleich der Blattoberflächen. Abbildung 10 zeigt die Blattunterseiten von *Viburnum rhytidophyllum* und *Fagus sylvatica* im direkten Vergleich.

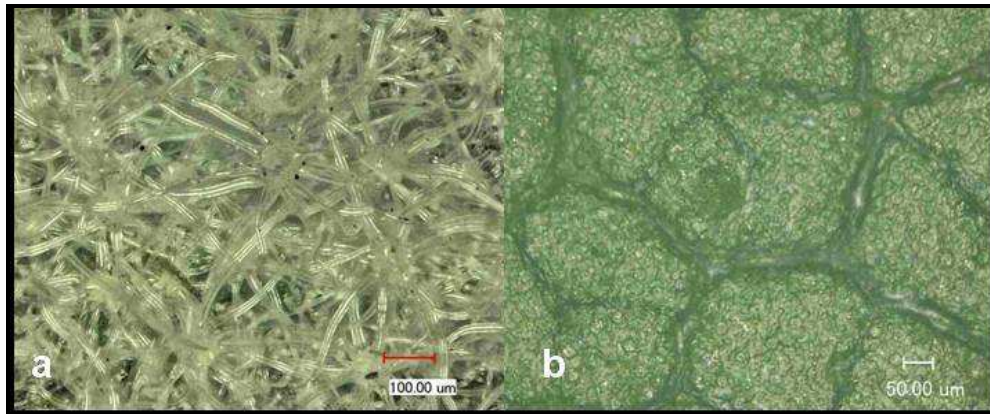


Abb. 10: Unterseiten von ausdifferenzierten Blättern von (a) *Viburnum rhytidophyllum* und (b) *Fagus sylvatica*.

Die adulten Blätter der beiden Spezies wiesen eine sehr unterschiedliche Morphologie auf. Der Runzelblättrige Schneeball war sehr stark mit Bündelhaaren versehen, die pro Bündel aus 20-40 Einzelhaaren zusammengesetzt waren und dadurch einen dichten, filzigen Belag bildeten, indem sich Stäube verstärkt ablagern konnten. Im Vergleich zu *Fagus sylvatica* wies der Runzelblättrige Schneeball eine sehr raue Blattoberflächenstruktur auf (Abb. 11).



Abb. 11: Blattunterseite von *Viburnum rhytidophyllum* mit dicht filziger Behaarung bestaubt mit Mittelstaub.

Die Blätter von *Fagus sylvatica* wiesen im juvenilen Stadium eine dichte Schutzbehaarung mit sehr langen Haaren auf, die bei der Maturation verloren gingen (WESTERKAMP & DEMMELMEYER 1997). Hinzu kam die Morphologie der Sporen. Die Sporen des Keulenbärlapps hatten eine kugelige Gestalt und eine Größe von rund

30 μm (Abb. 6). Die recht großen Partikel hielten sich besonders auf rauen Oberflächen (CHAMBERLAIN & CHADWICK 1972).

Auf sehr dicht behaarten Blättern fand sich eine flächige Verteilung der Sporen über die gesamte Blattspreite (Abb. 12). In größeren Strukturen auf dem Blatt, z.B. bei lockerer Behaarung, gelangten die Sporen auch in die tieferen Bereiche der Haarzwischenräume.

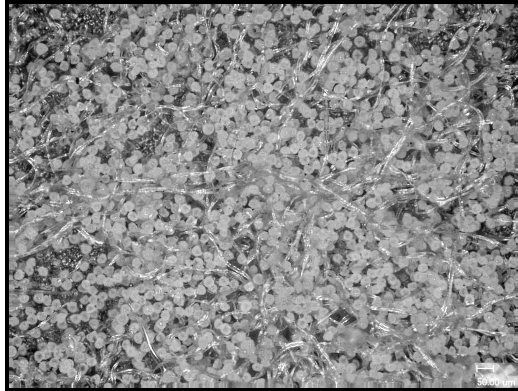


Abb. 12: Blattunterseite von *Sorbus intermedia* bestaubt mit Mittelstaub (*Lycopodium*).

Es zeigte sich im Rahmen der untersuchten Arten ein mittleres Staubfangvermögen bei *Ribes sanguineum* von $0,64 \pm 0,05 \text{ mg/cm}^2$ für Mittelstaub. Auch die Zierjohannisbeere wies eine starke Behaarung auf. Blattoberseite und Blattunterseite waren mit dichten Einzelhaaren versehen, zudem fanden sich viele Drüsenhaare.

Die Effektivität der Staubimpaktion hängt massiv von der Klebrigkeit und Feuchtigkeit der Oberfläche ab (CHAMBERLAIN 1967). Die drüsigen Köpfchenhaare der Zierjohannisbeere hielten einen Teil der *Lycopodium* Sporen fest. Der nur mittelmäßige Staubauftrag war möglicherweise mit der zwar flächig vorhandenen Behaarung auf Ober- und Unterseite zu erklären, diese war jedoch aus der Nähe betrachtet, recht grobmaschig und verhinderte womöglich ein Anhaften des Mittelstaubes zwischen den Einzelhaaren (Abb. 13).

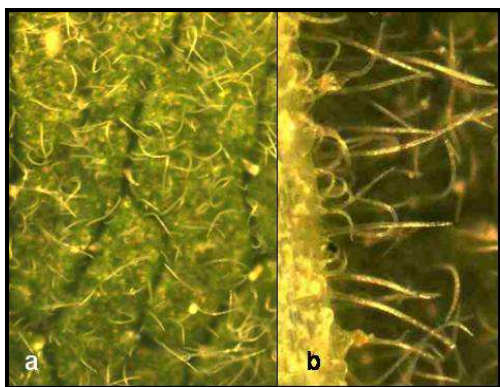


Abb. 13: Blattunterseiten von *Ribes sanguineum*, (a) mit flächiger Einfachbehaarung (25 fach vergrößert), (b) Detailaufnahme Einfachhaar (50 fach vergrößert).

Die Chemie der Oberfläche, ihre Rauigkeit und Turbulenz beeinflusst die Deposition von Partikeln. Die meisten Pollen und Sporen sind hydrophob, was eine unterstützende Wirkung bei der Ausbreitung darstellt.

Blätter sind relativ Wasser abweisend auf der Blattoberseite, währenddessen sie auf der Blattunterseite benetzbar sind (JUNIPER 1983). Unter den untersuchten Arten, die eine relativ glatte Oberfläche aufwiesen, zeigte sich dies in einem reduzierten Staubfangvermögen. Die niedrigsten Werte waren u.a. bei *Sambucus nigra*, *Fagus sylvatica* und *Chamaedorea elegans* zu finden mit einem Staubfangvermögen unter 0,2 mg/cm² (Tab. 12).

Über die Mechanismen der Deposition von Partikeln auf pflanzlichen Oberflächen, insbesondere im Größenbereich zwischen 1-50 µm, sind zahlreiche Studien, beispielsweise von CHAMBERLAIN et al. (1967,1972,1975), GREGORY (1973) INGOLD (1971), und SLINN (1982) durchgeführt worden. CHAMBERLAIN führte u.a. Untersuchungen im Windkanal zu Depositionsgeschwindigkeiten von *Lycopodium* Sporen auf pflanzlichen Oberflächen durch, um sie als Grundlage für Modellberechnungen über die Deposition von Partikeln über Wäldern und über die Verbreitung von pathologischen Erregern (Pilze) über landwirtschaftlich genutzten Flächen zu nutzen. So wiesen Sporen und Pollen eine durchschnittliche Sinkgeschwindigkeit von 10 cm/s auf (CHAMBERLAIN 1975). Sporen können ab Windgeschwindigkeiten von 2 m/s von Blättern verweht werden, andere Untersuchungen an *Monilinia laxa* zeigten erst eine Lösung bei 11 m/s. Die Ergebnisse von INGOLD (1971) wiesen auf eine gute Filterung von Blattstielen und Zweigen für Sporen hin.

RAYNOR et al. 1966 und RAYNOR 1967 untersuchten die Abscheidung von *Ambrosia artemisifolia* (Beifußblättrige Ambrosie) und stellten fest, dass in einem Waldstück bis zu 80 % der Pollen, im Gegensatz zu einer offenen Fläche, abgeschieden wurden. Untersuchungen wiesen darauf hin, dass Laubbäume gute Fänger von Pollen sind (NEUBERGER et al. 1967, STEUBING & KLEE 1970).

Wie aus Tabelle 12 ersichtlich spielt die Behaarung der Oberflächen eine große Rolle im Bezug auf ihr Staubfangvermögen.

Trichome und Emergenzen haben in der Pflanzenwelt verschiedenste Funktionen. Trichome sind epidermale Anhangsgebilde mit verschiedenen Aufgaben, Formen und Strukturen, währenddessen Emergenzen vielzellige Auswüchse sind, die auch aus subepidermalen Geweben gebildet werden. Sie können an allen Teilen der Pflanze vorkommen (CUTTER 1976). So dienen sie oftmals als Fraßschutz, in dem

Silikate oder Säuren (Bsp. Brennhaar bei *Urtica dioica*) eingelagert sind. Die gebogenen Haare von *Phaseolus vulgaris* können in die Tarsen von Blattläusen eindringen und sie so verletzen (LEVIN 1973). Klimm- und Hafthaare (Bsp. *Galium aparine*) erhöhen den Reibungswiderstand zwischen Kletterspross und seiner Stütze und begünstigen die Samenverbreitung. Absorptionshaare (z.B. Schuppenhaare bei tropischen Epiphyten) unterstützen die Aufnahme von Wasser und den darin gelösten Substanzen. Daneben sondern Drüsenhaare Stoffe ab, die entweder bei carnivoren Pflanzen der Nahrungsaufnahme durch Tierfang dienen oder als Fraßschutz fungieren. Ein bekanntes Beispiel hierfür ist der polysaccharidhaltige Fangschleim beim Sonnentau, der durch Aufreißen der Kutikula in den Drüsenhaaren freigesetzt wird (SITTE et al. 1999). Zu nennen sind noch Hydathoden, Fühlhaare, Saughaare, Salzhaare als auch Nektarien. Je nach Autor (Bsp. GASSNER 1973, HUMMEL & STAESCHE 1962, UPHOF 1962) lassen sich noch weitere Einteilungen finden, die aufgeführten Funktionen sollen an dieser Stelle jedoch genügen.

Sehr viele Arten besitzen hypostomatische Blätter, d.h. die Stomata befinden sich ausschließlich auf der Blattunterseite. Viele der Spezies weisen dort eine ausgeprägte Behaarung auf, die einen zu hohen Transpirationsverlust verhindern soll. Einige Pflanzenarten, wie z.B. beim Runzelblättrigen Schneeball, wiesen an den juvenilen Trieben und den Knospen eine starke Behaarung auf. Gerade an noch unentwickelten Organen stellt diese Behaarung eine wichtige Schutzfunktion dar. Eine starke Blattbehaarung auf der oftmals stomatafreien Blattoberfläche ist ein sehr wirksamer Schutz gegen übermäßige Erwärmung durch Insolation (LABER 1954). Die mit Luft gefüllten Räume zwischen den häufig toten (=weißen) Haaren bilden eine Isolationsschicht und dienen dem Kälteschutz. Daneben reflektieren insbesondere weiße Haare besonders gut Strahlung und schützen somit vor strahlungsbedingten Schäden. Lebende Haare tragen zu einer Oberflächenvergrößerung und damit gesteigerten Transpirationsrate bei. Ob und wo eine Behaarung zu finden ist, hängt vom natürlichen Vorkommen der Arten und deren Anpassung an den Lebensraum ab. Bei vielen Blättern hängt die Dichte der Behaarung vom Lebensalter der Blätter ab. Ältere Blätter verlieren häufig ihre Haare, wobei tendenziell die Behaarung auf der Unterseite am längsten erhalten bleibt und dort verstärkt in den Nervenachsen (WESTERKAMP & DEMMELMEYER 1997).

Generell lassen sich verschiedene Haartypen unterscheiden (Abb. 14).

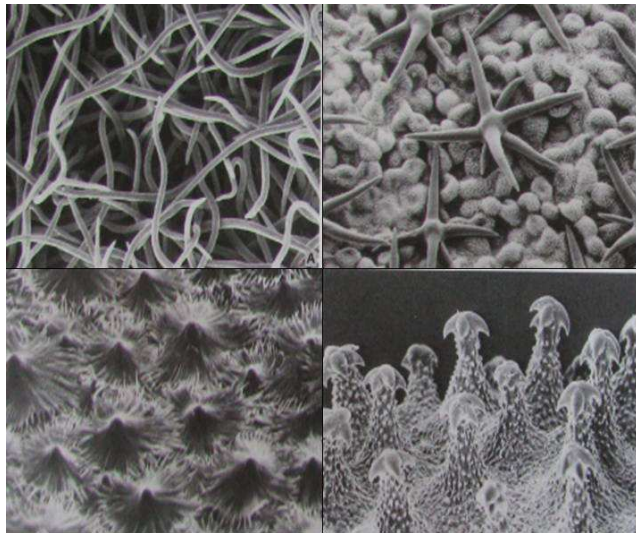


Abb. 14: Verschiedene Formen pflanzlicher Haare. **(a)** Einzelhaare an der Blattunterseite von *Rubus fruticosus*, **(b)** Sternhaare von *Viola surinamensis*, **(c)** Schildhaare von *Hippophae rhamnoides*, **(d)** widerhakige Gebilde auf der Samenschale von *Cynoglossum officinale*. Abbildungen a-d aus SITTE et al. 1999

Die Einteilung der Haartypen ist von verschiedenen Autoren bereits seit langem beschrieben worden (Bsp. HUMMEL & STAESCHE 1962, UPHOF 1962). Dabei ist die Typisierung nicht ganz einheitlich, da zwischen den einzelnen Haaren gleitende Übergänge zu finden sind. Verschiedene Trichomtypen können an einer Pflanzenart vorkommen (CUTTER 1976).

Im Weiteren erfolgt die Einteilung der Haare nach WESTERKAMP & DEMMELMEYER (1997), die sechs Grundformen unterscheiden. Eine Unterteilung in Trichom und Emergenz erfolgt hier nicht, beide werden als Haar zusammengefasst.

Es werden Einfach-, Bündel-, T-, Köpfchen-, Schild- und Bäumchenhaare unterschieden, wobei oftmals Übergänge zu finden sind, die eine korrekte Einteilung erschweren.

Die einzelnen Haartypen werden nach WESTERKAMP & DEMMELMEYER (1997) wie folgt definiert:

<u>Einfachhaar:</u>	Jedes unverzweigte Haar ohne auffällige Schwellungen am distalen Ende, die Insertion kann breit-kegelförmig oder parallelwandig sein.
<u>Bündelhaar:</u>	Mehrere Haare entspringen \pm einem Punkt und sind mehr oder weniger aufgerichtet
<u>T- Haar:</u>	T-förmig verzweigtes Haar, meist Verzweigung sehr viel länger als Achse
<u>Köpfchenhaare:</u>	Haar, dessen Ende kopfig verdickt und z.T. vielzellig ist, funktionell oft Drüsenhaare
<u>Bäumchenhaare:</u>	Haar, das in mehreren Ebenen verzweigt ist.
<u>Schildhaar:</u>	Haar, das am Ende schildförmig verzweigt (peltat) ist und damit schirmartig aussieht. Die Schirmebene ist flächig, dünn, nicht voluminös wie bei Köpfchenhaaren.

Die bei anderen Autoren oft genannten Sternhaare fassen WESTERKAMP & DEMMELMEYER (1997) unter den Schildhaaren zusammen und definieren sie wie folgt: „Sternhaare sind Schildhaare, bei dem die „Speichen“ des Schildes zum größten Teil frei stehen und nicht zu einer Fläche verbunden sind wie beim Schirmhaar.“

Die Morphologie der verschiedenen Haartypen schien für das Staubfangvermögen eine eher untergeordnete Rolle zu spielen. Entscheidender für das Bindevermögen war eine flächige und dichte Verteilung auf der Pflanzenoberfläche (u.a. *Tab. 12*).

Eine dichte filzige Behaarung mit Einzelhaaren war demnach vergleichbar effektiv mit einer dichten Behaarung mit Bündel-, Schild- und Bäumchenhaaren. Die aus mehreren Haaren zusammengesetzten und verzweigten Haare bedingten somit bei den untersuchten Arten allgemein immer ein hohes Staubfangvermögen, insgesamt waren sehr dichte Einfachhaare jedoch ähnlich effektiv (*Tab 12*.)

Eine Auflistung einiger untersuchten Pflanzen und deren Haartypen findet sich in Tabelle 13.

Tab. 13: Haartypen verschiedener Pflanzen verändert nach WESTERKAMP & DEMMELMEYER 1997, OS (Blattoberseite), US (Blattunterseite)

	Einfachhaare		Köpfchenhaare		Bündelhaare		Schildhaare		Bäumchenhaare	
	Lokalisation	Morphologie	Lokalisation	Morphologie	Lokalisation	Morphologie	Lokalisation	Morphologie	Lokalisation	Morphologie
<i>Buddleja davidii</i>					OS locker, US locker bis dicht	Länge der Einzelhaare: 90-350µm, 4 gerade Haare im Bündel				
<i>Carpinus betulus</i>	OS u US locker, auf Hauptnerven u Nervenachsen	Länge: 125-1700µm, gerades Haar	OS vereinzelt, auf Hauptnerven, senkrechtes Haar	Köpfchen-durchmesser 35-50µm						
<i>Corylus avellana</i>	OS u US locker, auf Hauptnerven, Nervenachsen u untergeordneten Nerven	Länge: 50-1300µm	OS locker, US einzeln, auf Hauptnerven	Länge: 30-60µm						
<i>Corylus colurna</i>	OS u US locker, auf Hauptnerven, Nervenachsen u untergeordneten Nerven	Länge: 40-100µm; gerade, glattes Haar	OS u US locker, auf Hauptnerven	Länge: 45-140µm, kurz gestielt, unverzweigt, gekippt oder anliegend						
<i>Fagus sylvatica</i>	OS locker, US locker bis dicht, auf Hauptnerven, Nervenachsen und Interkostalfeldern	Länge: 1100-3000µm, gerades Haar, gekippt bis anliegend								
<i>Hedera helix</i>					US vereinzelt, Hauptnerven, Nervenachsen	Länge: 125-325µm, gerades, glattes Haar				
<i>Parthenocissus tricuspidata</i>	OS u US locker	Länge: 25-130µm								

Fortsetzung Tab.13

	Einfachhaare		Köpfchenhaare		Bündelhaare		Schildhaare		Bäumchenhaare	
	Lokalisation	Morphologie	Lokalisation	Morphologie	Lokalisation	Morphologie	Lokalisation	Morphologie	Lokalisation	Morphologie
<i>Quercus robur</i>	US locker, auf Nerven u Intercostalfeldern OS einzeln auf Hauptnerven	Länge: 70-130mm oben einzeln auf Hauptnerven, Länge: 230-273µm	OS einzeln auf Hauptnerven	Länge: 70µm	OS einzeln auf Hauptnerven	Länge: 70µm		Länge: 140-280µm, 2 Haare im Bündel		
<i>Quercus rubra</i>	OS u US locker auf untergeordneten Nerven	Länge: 70-115µm			OS auf untergeordneten Nerven	Länge: 70-140µm, 4-5 Haare gebündelt				
<i>Rhododendron catawbiense</i>			US einzeln auf Hauptnerven	Länge: 65-100 µm					OS u US locker auf untergeordneten Nerven u Intercostalfeldern	Durchmesser Aggregat: 150-500µm
<i>Rhus typhina</i>	OS u US locker auf Hauptnerven u untergeordneten Nerven	Länge: 60-400 µm	OS u US locker auf Hauptnerven u untergeordneten Nerven	Länge: 45-120 µm						
<i>Sorbus intermedia</i>	US dicht, OS vereinzelt, auf Hauptnerven, Nervenachsen u Intercostalfeldern	Basisdurchmesser 8-13µm								
<i>Tilia tomentosa</i>	OS vereinzelt, auf Hauptnerven u Nervenachsen	Länge 50-130µm, Haar gerade					US dicht, OS vereinzelt	Länge: 50µm		
<i>Viburnum lantana</i>	OS locker, auf Hauptnerven u untergeordneten Nerven	Länge: 400-600µm	US einzeln, OS einzeln auf Hauptnerven	Länge: 40-55µm, unverzweigt, ungestielt	OS einzeln, US locker Hauptnerven Achsel u Intercostalfelder	Länge: 100-500µm, 2-10 Haare, 20+ Haare, Länge: 50-180 µm				
<i>Viburnum rhytidophyllum</i>					US dicht, OS locker	Länge der Einzelhaare: 90-500µm, 20-40 Haare im Bündel, auf Sockel inseriert.				

Unter den hier untersuchten Arten dominierte der Behaarungstyp mit Einfachhaaren. Einfachhaare fanden sich sowohl bei *Sorbus intermedia*, die mit die höchsten Staubaufträge erzielte, als auch bei *Fagus sylvatica*, die das niedrigste Staubfangvermögen aufwies. Ausschlaggebend für die Staubfangkapazität war die Dichte der Haare. Waren Blätter besonders auf der Unterseite dicht mit Haaren versehen, so konnte sich verstärkt Mittelstaub halten, da damit die Rauigkeit der Oberfläche enorm vergrößert wurde. Dies konnte am Beispiel von *Sorbus intermedia* gezeigt werden (Tab. 13).

Die Einzelhaarlänge innerhalb der untersuchten Arten variierte zwischen 50 und 3000 μm und zeigte die große Vielfalt und Diversität der verschiedenen Trichome und Emergenzen im Pflanzenreich. Die Länge der Haare variierte innerhalb einer Art bereits stark (Bsp. 125-1700 μm Haarlänge bei *Carpinus betulus*, Tab. 13), so dass im Rahmen dieser Untersuchung kein besonderer Einfluss der Haarlänge auf den Staubauftrag festzustellen war.

Der Einfluss der Dichte der Behaarung und Verteilung auf der Oberfläche schien allgemein den größten Einfluss auf das Staubfangvermögen zu bedingen.

3.1.1.1.2 Feinstaub - Geogener Staub

Das für die Bestäubungsversuche eingesetzte geogene Fimonit wurde mit zwei verschiedenen Methoden in unterschiedliche Fraktionen getrennt und analysiert.

Auf gravimetrischem Weg wurde das Gesamtfimonit, mit der überwiegenden Fraktionsgröße PM10 bestimmt und anschließend über turbidimetrische Trübungsmessung der PM2.5 Anteil untersucht.

Insgesamt wurden 82 Arten auf ihr Feinstaubfangvermögen hin erforscht.

Unter den untersuchten Arten stach *Viburnum rhytidophyllum* sehr deutlich hervor. Sein Staubfangvermögen lag mit $9,76 \pm 2,57$ mg/cm² PM10 und $7,65 \pm 2,12$ mg/cm² PM2.5 nahezu dreimal so hoch wie bei angrenzenden Arten mit einem Fangvermögen von um die 3 mg/cm² PM10 (Tab. 14).

Lagurus ovatus, *Ribes sanguineum* als auch *Sorbus intermedia* erreichten Werte zwischen 2,3 und 3,9 mg/cm² PM10 und zwischen 1 und 2,1 mg/cm² bei PM2.5 und zählten unter den untersuchten Arten zu den besten Staubfängern.

Bei 22 Arten lag der Staubauftrag über 1 mg/cm² (mit eingeschlossen *Hieracium pilosella* $0,99 \pm 0,06$ mg/cm² und *Alchemilla mollis* $0,94 \pm 0,27$ mg/cm² PM10). *Phlomis fruticosa*, *Althaea officinalis*, *Corylus colurna*, *Festuca cinerea* und *Tilia tomentosa* erreichten ebenfalls ein hohes flächenbezogenes Staubfangvermögen für Feinstaub PM10 und PM2.5 (Tab. 14).

Bei dem größten Teil der untersuchten Arten (70 Arten) wurden Staubaufträge unter 1 mg/cm² PM10 festgestellt, wobei sich der Staubauftrag aller Spezies gleichmäßig im Bereich zwischen 1 und 0,05 mg/cm² PM10 verteilte. Innerhalb dieser Einteilung (alle unter 1 mg/cm²) fanden sich auf *Bromus erectus* und *Rhus typhina* Staubaufträge von $0,7 \pm 0,13$ mg/cm² und $0,61 \pm 0,19$ mg/cm² PM10. Die geringsten Mengen an Staub (< 0,1 mg/cm² PM10) konnten auf *Taraxacum officinalis*, *Euonymus europaeus*, *Robinia pseudoacacia* und *Betula pendula* bestimmt werden. Das schlechteste Staubfangvermögen erzielte *Clematis vitalba*, auf der nur geringste Menge an Staub PM10 ($0,05 \pm 0,01$ mg/cm²) haften blieben.

Tab. 14: Das maximale, flächenbezogene Feinstaubfangvermögen (PM10 und PM2.5) [mg/cm²] von Blättern (OS u. US) diverser Pflanzenspezies. Dargestellt ist der Mittelwert (n=25) mit SD alphabetisch nach dem maximalen Mittelstaubfangvermögen sortiert mit Angaben zur Behaarung.

Wissenschaftlicher Name	PM10	SD	PM2.5	SD	Anmerkung
<i>Acer pseudoplatanus</i>	0,19	0,07	0,19	0,04	keine nennenswerte Behaarung (1)
<i>Aesculus hippocastanum</i>	0,24	0,09	0,23	0,06	keine nennenswerte Behaarung (4)
<i>Agrostis stolonifera</i> *	0,46	0,15	0,59	0,17	keine nennenswerte Behaarung (2)
<i>Ajania pacifica</i>	0,3	0,07	0,22	0,03	Einzelhaare, OS u US dicht, anliegend an Blatt (4)
<i>Alchemilla mollis</i>	0,94	0,27	0,72	0,17	Einfachhaare OS u US dicht (4)
<i>Althaea officinalis</i>	1,93	0,64	1,76	0,43	Bündel- u Köpfchenhaare OS u US dicht (9)
<i>Anthoxanthum odoratum</i>	0,2	0,04	0,2	0,04	keine nennenswerte Behaarung, oder vereinzelt (2)
<i>Arrhenatherum elatius</i> *	1,37	0,31	0,75	0,18	OS leicht behaart oder kahl, schwach gerieft (2)
<i>Artemisia vulgaris</i>	0,33	0,04	0,08	0,02	US stark behaart, filzig, OS unbehaart (3)
<i>Berberis vulgaris</i>	0,35	0,06	0,04	0,02	keine nennenswerte Behaarung, wenige Einzelhaare (7)
<i>Betula pendula</i>	0,08	0,01	0,06	0,01	Einzelne Einfachhaare OS, Köpfchenhaare einzeln OS u US (1)
<i>Briza maxima</i>	0,19	0,04	0,13	0,03	keine nennenswerte Behaarung (2)
<i>Bromus erectus</i> *	0,7	0,13	0,49	0,15	schwach gerieft und behaart, an Blatträndern kammartig bewimpert (2)
<i>Bromus inermis</i> *	0,32	0,06	0,36	0,03	keine Behaarung (2)
<i>Bryonia dioica</i>	0,22	0,07	0,22	0,06	Einfachhaare, OS u US locker (4)
<i>Buddleja davidii</i>	1,41	0,36	1,12	0,29	Bündelhaare, OS locker, US dicht (1)
<i>Calathea rufibarba</i>	0,4	0,03	0,23	0,03	Einfachhaare, OS locker auf Nerven, US dicht (4)
<i>Calystegia sepium</i>	0,22	0,05	0,21	0,04	keine nennenswerte Behaarung (4)
<i>Carpinus betulus</i>	0,27	0,01	0,26	0,04	Einfach- u Köpfchenhaare locker (1)
<i>Chamaedorea elegans</i>	0,3	0,02	0,25	0,02	keine nennenswerte Behaarung (4)
<i>Clematis vitalba</i>	0,05	0,01	0,05	0,01	Einfachhaare auf Hauptnerven US (4)
<i>Convolvulus arvensis</i>	0,26	0,05	0,17	0,03	keine nennenswerte Behaarung (4)
<i>Corylus avellana</i>	1,12	0,27	0,76	0,15	Einfach- u Köpfchenhaare OS u US locker (1)
<i>Corylus colurna</i>	1,86	0,17	0,67	0,07	Einfach- u Köpfchenhaare, OS u US locker (1)
<i>Dactylis glomerata</i>	0,33	0,07	0,27	0,08	keine Behaarung, oder sehr schwach behaart (2)
<i>Deschampsia cespitosa</i>	0,48	0,07	0,07	0,01	keine nennenswerte Behaarung (2)
<i>Dracaena fragans</i>	0,45	0,02	0,16	0,02	keine nennenswerte Behaarung (4)
<i>Dracaena marginata</i>	0,48	0,05	0,22	0,04	keine nennenswerte Behaarung (4)
<i>Euonymus europaeus</i>	0,09	0,02	0,1	0,02	keine nennenswerte Behaarung (4)

Quellenangaben: (1) WESTERKAMP & DEMMELMEYER 1997, (2) CONERT 2000, (3) DOLL & KUTZELNIGG 1994, (4) FLOHR, eigene Beobachtung, (5) LABER 1954, (6) FROHNE & PFANDER 1997, (7) HUNNIEL & STAESCHKE 1962, (8) HUBBART 1985, (9) GASSNER 1973; (*) FUNKE 2008

Fortsetzung Tab. 14

Wissenschaftlicher Name	PM10	SD	PM2.5	SD	Anmerkung
<i>Fagus sylvatica</i>	0,41	0,05	0,17	0,02	Einfachhaare OS u US locker (1)
<i>Fallopia japonica</i>	0,52	0,11	0,46	0,07	keine nennenswerte Behaarung (4)
<i>Festuca cinerea</i> *	1,85	0,3	0,29	0,06	OS dicht u kurze Haare, US kahl (2)
<i>Ficus benjamina</i>	0,58	0,03	0,33	0,03	keine nennenswerte Behaarung (4)
<i>Filipendula ulmaria</i>	0,33	0,08	0,03	0,02	US weiß beflaumt, gefiederte und stark geäderte Blätter (3)
<i>Fraxinus excelsior</i>	0,25	0,04	0,22	0,06	Köpfchenhaare, OS u US locker (1)
<i>Galium aparine</i>	0,42	0,1	0,12	0,04	Kletthaare, locker auf OS u US (3)
<i>Geranium x magnificum</i>	1,15	0,32	1,1	0,23	Einfachhaare OS u US dicht (4)
<i>Hedera helix</i>	0,35	0,04	0,26	0,04	Bündelhaare, vereinzelt (1)
<i>Hieracium pilosella</i>	0,99	0,09	0,11	0,02	Einfachhaare, lang auf OS (4)
<i>Holcus lanatus</i>	1,49	0,21	1,24	0,35	OS u US weich u samtartig behaart, schwach ausgeprägte Riefen (2)
<i>Hordeum murinum</i> *	1,34	0,14	0,49	0,11	kurz behaart oder kahl (2)
<i>Humulus lupulus</i>	0,28	0,13	0,27	0,09	Hakenhaare, OS u US locker (3)
<i>Juglans regia</i>	0,12	0,03	0,11	0,03	keine Behaarung, in Nervenwinkeln wenig behaart (4)
<i>Lagurus ovatus</i> *	3,91	0,53	1,5	0,2	OS + US dicht, samtartig (8)
<i>Lamium album</i>	0,55	0,09	0,04	0,01	Einfachhaare OS u US dicht (4)
<i>Lavandula angustifolia</i>	0,49	0,11	0,29	0,09	Bündelhaare, OS u US dicht (4)
<i>Lolium multiflorum</i> *	0,35	0,09	0,27	0,08	keine nennenswerte Behaarung (2)
<i>Lolium perenne</i> *	0,3	0,06	0,26	0,09	keine nennenswerte Behaarung, stark gerieft (2)
<i>Nephrolepis exaltata</i>	0,57	0,06	0,39	0,05	keine nennenswerte Behaarung (4)
<i>Parthenocissus quinquefolia</i>	0,26	0,04	0,26	0,01	Einfachhaare, OS u US locker (1)
<i>Parthenocissus tricuspidata</i>	0,13	0,05	0,12	0,03	lockere Einfachhaare (1)
<i>Pelargonium peltatum</i>	0,41	0,08	0,31	0,07	Köpfchenhaare (Drüsenhaare) OS u US dicht (4)
<i>Petunia x hybrida</i>	0,37	0,09	0,34	0,08	Köpfchenhaare (Drüsenhaare), OS u US dicht (4)
<i>Philadelphus coronarius</i>	0,15	0,03	0,12	0,02	US Nerven behaart, schwache Achselbärte
<i>Phleum pratense</i> *	0,53	0,19	0,5	0,22	keine nennenswerte Behaarung (2)
<i>Phlomis fruticosa</i>	2,13	0,68	1,37	0,38	Bündelhaare OS u US dicht (5)
<i>Plantago major</i>	0,57	0,06	0,14	0,03	keine nennenswerte Behaarung (4)

Quellenangaben: (1) WESTERKAMP & DEMMELMEYER 1997, (2) CONERT 2000, (3) DOLL & KUTZELNIGG 1994, (4) FIOHR, eigene Beobachtung, (5) LASER 1954, (6) FROHNE & PFÄNDER 1997, (7) HUMMEL & STAESCHKE 1962, (8) HUBBART 1985, (9) GASSNER 1973, (*) FUNKE 2008

Fortsetzung Tab. 14

Wissenschaftlicher Name	PM10	SD	PM2.5	SD	Anmerkung
<i>Platanus x hispanica</i>	0,13	0,03	0,1	0,02	Etagenhaare, wenige im juvenilen Stadium (3)
<i>Poa annua</i> *	0,57	0,19	0,34	0,14	keine nennenswerte Behaarung (2)
<i>Potentilla anserina</i>	1,2	0,26	0,12	0,03	OS locker, US dicht seidenhaarig (3)
<i>Prunus laurocerasus</i>	0,42	0,06	0,38	0,04	keine nennenswerte Behaarung (4)
<i>Prunus spinosa</i>	0,15	0,03	0,03	0,01	keine nennenswerte Behaarung (4)
<i>Pyrus pyrastr</i>	0,26	0,04	0,05	0,01	keine nennenswerte Behaarung, nur kurz nach Austrieb (3)
<i>Quercus robur</i>	0,19	0,07	0,17	0,04	Einfach/ Köpfchen/ Bündelhaare, OS u US locker (1)
<i>Quercus rubra</i>	1,33	0,18	0,83	0,14	Einfach- u Bündelhaare OS u US locker (1)
<i>Rhododendron catawbiense</i>	0,37	0,08	0,3	0,06	keine nennenswerte Behaarung (4)
<i>Rhus typhina</i>	0,61	0,19	0,57	0,11	Einzel- u Köpfchenhaare OS u US locker (1)
<i>Ribes sanguineum</i>	3,57	0,47	3,18	0,62	Einfachhaare OS u US dicht, Köpfchenhaare (Drüsenhaare) (6)
<i>Robinia pseudoacacia</i>	0,08	0,02	0,09	0,01	Einfachhaare einzeln OS u US (1)
<i>Salvia officinalis</i>	1,31	0,17	0,72	0,11	Einfach- u Köpfchenhaare, OS u US dicht (9)
<i>Sambucus nigra</i>	0,28	0,06	0,25	0,07	keine nennenswerte Behaarung (4)
<i>Setaria glauca</i>	0,35	0,12	0,23	0,06	keine nennenswerte Behaarung, einzelne Haare möglich (2)
<i>Solidago gigantea</i>	0,43	0,12	0,39	0,12	keine nennenswerte Behaarung (4)
<i>Sorbus aucuparia</i>	0,46	0,05	0,39	0,03	Einfachhaare, OS unbehaart u US locker (1)
<i>Sorbus intermedia</i>	2,31	0,41	1,01	0,21	Einfachhaare US dicht, OS locker (1)
<i>Tanacetum vulgare</i>	0,18	0,03	0,21	0,04	Einfachhaare OS u US locker (4)
<i>Taraxacum officinalis</i>	0,09	0,02	0,03	0,01	keine nennenswerte Behaarung (4)
<i>Tilia tomentosa</i>	1,6	0,2	1,21	0,13	Schildhaare US dicht, OS vereinzelt (1)
<i>Urtica dioica</i>	0,35	0,03	0,11	0,03	Einfach- u Brennhaare OS u US dicht (4)
<i>Viburnum lantana</i>	1	0,27	0,41	0,13	Einfach- u Köpfchenhaare OS u US locker, Bündelhaare US dicht (5)
<i>Viburnum rhytidophyllum</i>	9,76	2,57	7,65	2,12	Bündelhaare US dicht, OS locker, 20-40 Haare gebündelt, (1)
<i>Weigelia middendorffiana</i>	1,29	0,12	1,12	0,14	OS u US dichte Behaarung (4)

Quellenangaben: (1) WESTERKAMP & DEMMELMEYER 1997, (2) CONERT 2000, (3) DÜLL & KUTZELNIGG 1994, (4) Flohr, eigene Beobachtung, (5) LABER 1954, (6) FROMME & PFÄNDER 1997, (7) HUMMEL & STAESCHKE 1962, (8) HUBBART 1985, (9) GASSNER 1973; (*) FUNKE 2008

Wie bereits für Mittelstaubauflagerungen gezeigt werden konnte (Kap. 3.1.1.1.1), haben auch für den Feinstaubauftrag PM₁₀ und PM_{2.5} Haare einen maßgeblichen Einfluss auf die Quantität der Auflage. Für alle Arten wurde die Behaarung untersucht und nach Typ, Lokalisation (Blattober- und Blattunterseite) als auch Dichte (keine Haare, lockere oder dichte Behaarung) eingeteilt (Tab. 14).

Allgemein zeigte sich, dass eine dichte Behaarung mit einem erhöhten Staubauftrag einherging. Die Arten mit dem größten Staubfangvermögen besaßen alle überwiegend Bündel-, Einfach- und Köpfchenhaare. Dabei schien der Typ der Haare weniger stark von Bedeutung zu sein, vielmehr war entscheidend, dass eine sehr dichte, filzige Behaarung vorlag.

Auf Blättern können umso mehr Partikel haften bleiben, desto größer die Rauigkeit der Blätter, d.h. ihre Behaarung und Unebenheiten sind (STEUBING et al. 1974). Arten wie z.B. *Viburnum rhytidophyllum*, *Lagurus ovatus*, *Ribes sanguineum*, *Sorbus intermedia* und *Phlomis fruticosa* wiesen alle eine starke Behaarung auf, die auf der Blattoberseite als auch auf der Blattunterseite sehr dicht war (Tab. 14).

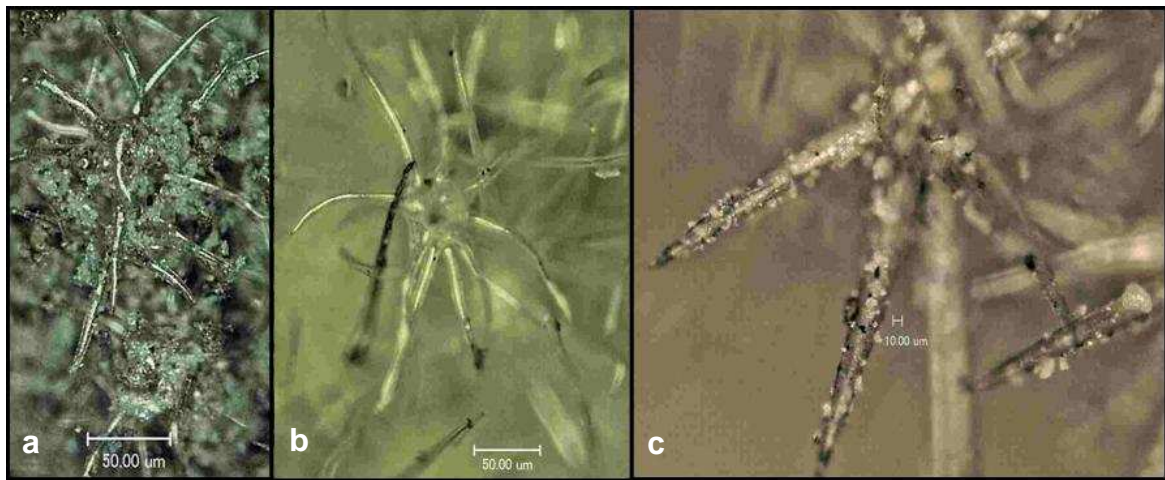


Abb. 15: Bündelhaare auf der Blattunterseite von *Viburnum rhytidophyllum* (a) dichtes Geflecht aus mehreren Schichten Haare bestaubt mit Feinstaub, (b) einzelnes Bündelhaar unbestaubt, (c) Ausschnitt eines bestaubten Bündelhaares mit Feinstpartikeln.

Die Staubpartikel gelangten bis in die unteren Haarschichten und bildeten dort zum einen Agglomerate (Abb. 15a), zum anderen banden sich die Partikel (PM₁₀ und PM_{2.5}) unmittelbar um die feinen einzelnen Haare der Bündelhaare (Abb. 15 c).

Abnehmend mit der Behaarung ging auch das Staubfangvermögen für PM₁₀ als auch für PM_{2.5} zurück. Beispielhaft konnte dies an *Phlomis fruticosa* mit sehr dichten Bündelhaaren auf Blattober- und -unterseite und mit einem hohen Staubfang-

vermögen von $2,13 \pm 0,68 \text{ mg/cm}^2$ PM10 und $1,37 \pm 0,38 \text{ mg/cm}^2$ PM2.5 gezeigt werden (Abb. 16). Die Bündelhaare bildeten eine dichte Schicht aus Haaren, an die sich der Feinstaub direkt anlagern und auch in tiefere Schichten ablagern konnte.

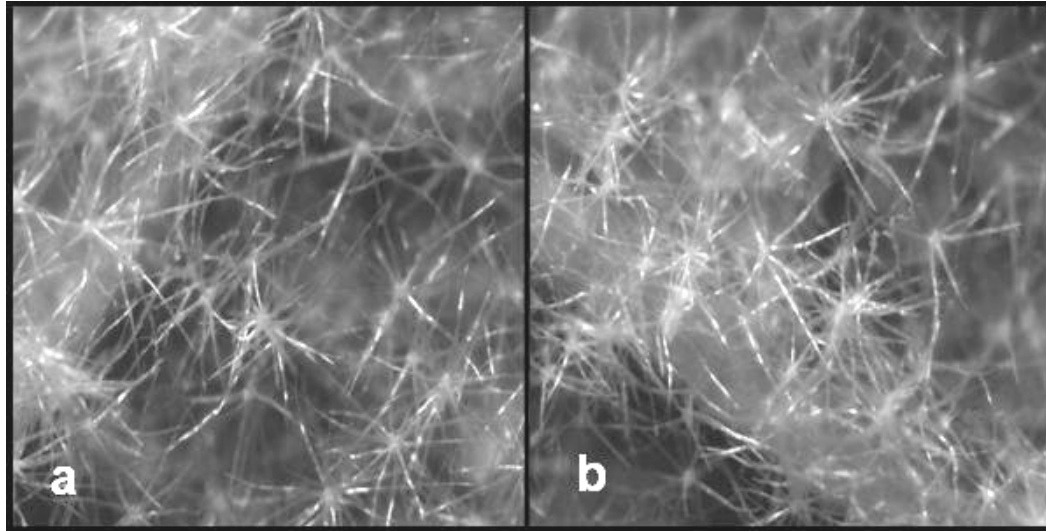


Abb. 16: Blätter von *Phlomis fruticosa* (a) Blattoberseite und (b) Blattunterseite mit dichter Behaarung mit Bündelhaaren. 50fache Vergrößerung

Ein deutlich geringeres Staubfangvermögen erzielte z.B. *Rhus typhina*, der Werte von $0,61 \pm 0,19 \text{ mg/cm}^2$ PM10 und $0,57 \pm 0,11 \text{ mg/cm}^2$ PM2.5 erreichte. Auf den Blättern des Essigbaumes fanden sich auf der Ober- als auch Unterseite der Blätter lockere Einzel- und Köpfchenhaare (Abb. 17). In der Oberflächenstruktur der Blätter lag der geringere Staubauftrag begründet. Die Behaarung des Essigbaumes war durch Berührung der Oberfläche fühlbar, jedoch waren die Einzel- und Köpfchenhaare bei näherer Betrachtung deutlich auseinander gesetzt, so dass sie nur einen bedingt guten Raum zur Feinstaubbindung boten (Abb. 17).

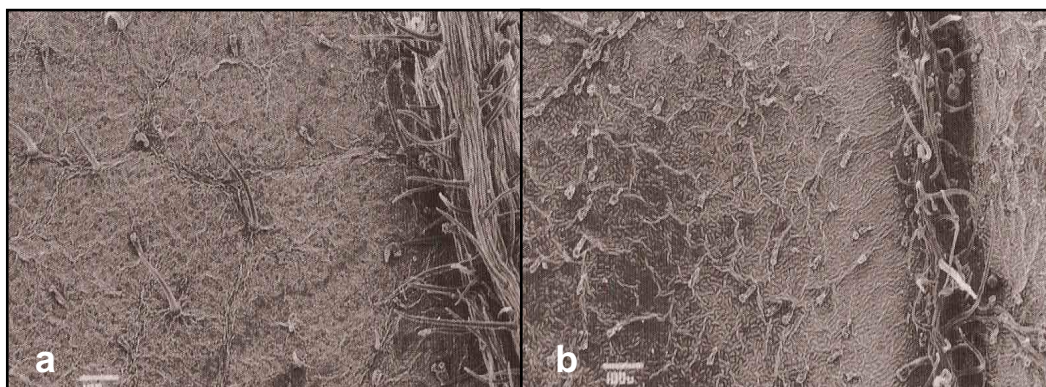


Abb. 17: Blätter von *Rhus typhina* (a) Blattunterseite und (b) Blattoberseite mit lichter Behaarung mit Einfach- und Köpfchenhaaren (WESTERKAMP & DEMMELMEYER 1997)

Die juvenilen Blätter von *Platanus x hispanica* waren mit wenigen Etagenhaaren (Abb. 18) besetzt, die im Laufe der Maturation verloren gingen, sodass voll ausdifferenzierte Blätter keine nennenswerte Behaarung aufwiesen.

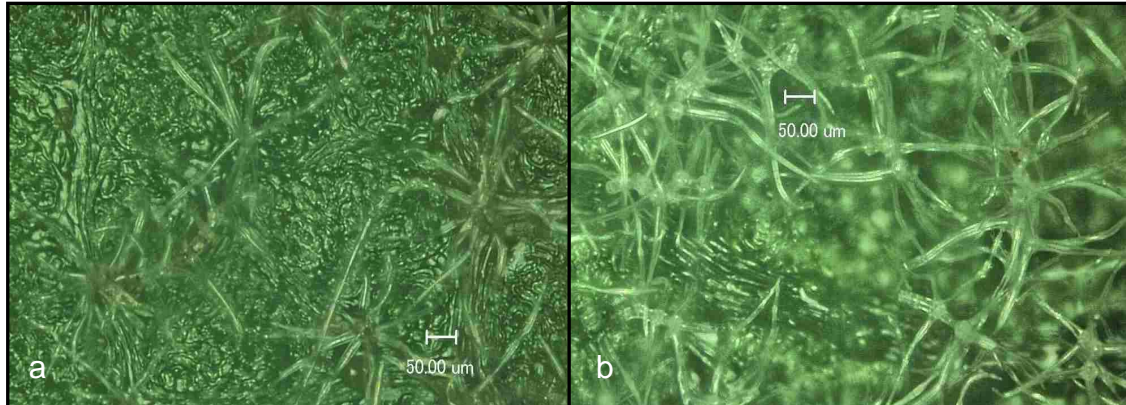


Abb. 18: Junges, undifferenziertes Blatt von *Platanus x hispanica* (a) Blattoberseite (b) Blattunterseite jeweils mit Etagenhaaren

Die geringen Mengen Staub auf den Blättern von *Platanus x hispanica* ($0,13 \pm 0,03$ mg/cm² PM₁₀, $0,1 \pm 0,02$ mg/cm² PM_{2.5}) stimmten mit den Ergebnissen von HELBING (1973) überein, der einmalige Messungen der Staubauflage von *Acer campestre*, *Aesculus hippocastanum*, *Tilia cordata*, *Betula pendula*, *Platanus x hispanica* und *Quercus robur* im Stadtgebiet Bonn durchgeführt und die niedrigsten Raten bei *Platanus x hispanica* bestimmt hatte.

Das geringe festgestellte maximale Feinstaubfangvermögen von PM₁₀ unterstützte die These, dass Haare bestimmend für ein hohes Staubfangvermögen sind.

Im Falle von *Platanus x hispanica* konnte durch molekulargenetische Untersuchungen festgestellt werden, dass die Familie der *Platanaceae* (Platanengewächse), ebenso wie die Familie der *Nelumbonaceae* (Lotosgewächse) und *Proteaceae* (Silberbaumgewächse) der Ordnung der *Proteales* angehören. Der Selbstreinigungseffekt, der bei Lotos (*Nelumbo nucifera*) unter dem Namen Lotoseffekt (BARTHLOTT & NEINHUIS 1997) bekannt wurde, wird auch bei der Platane vermutet. Rasterelektronische Aufnahmen von Platanenblättern zeigten eine nahezu saubere Blattoberfläche, die nahe legte, dass bei Regenerscheinungen eine Selbstreinigung der Oberfläche stattfand (THÖNNESSEN 2002). Die Blattoberfläche zeigte auch bei gleich bleibender Staubbelastung am Ende der Vegetationszeit eine nur sehr geringe Staubauflagerung (Abb. 19).

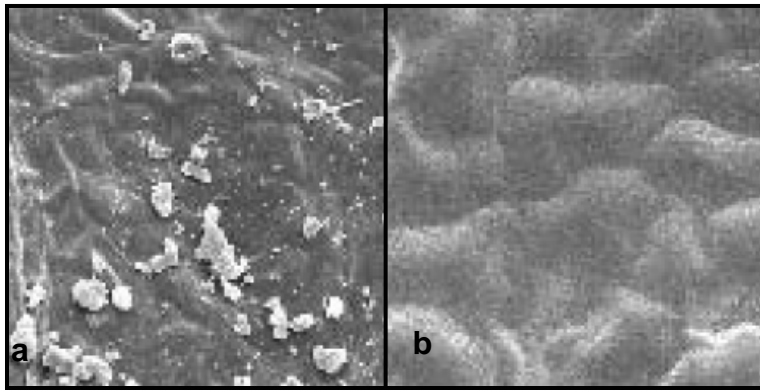


Abb. 19: Blattoberseiten von *Platanus x hispanica* im rasterelektronischen Bild. (a) ungereinigte Blattoberfläche im Oktober 2003, (b) gereinigte Blattoberfläche (THÖNNESEN & HELLACK 2005)

Das Mikrorelief von Pflanzenoberflächen, welches hauptsächlich durch epikutikuläre Wachskristalle bedingt ist, verursacht oft eine hydrophobe Oberfläche, an der Wasser abperlt und nicht anhaften kann (BARTHLOTT & NEINHUIS 1997). Die Anheftung von Schmutzpartikeln ist daher stark reduziert. Wasserabweisung hängt von der Blattoberflächenrauhigkeit, bedingt durch unterschiedliche Mikrostrukturen (Trichome, kutikuläre Wachse) und den hydrophoben Eigenschaften der epikutikulären Wachse, ab. Blätter, die permanent wasserabweisend sind, besitzen meist konvexe, papillöse epidermale Zellen und sehr dichte Schichten epidermaler Wachse. Die meisten Wasser abweisenden Arten finden sich unter den Kräutern, während Bäume nur vereinzelt Wasser abweisend sind (NEINHUIS & BARTHLOTT 1997b). Wasserabweisung erleichtert die Reinigung von Blattoberflächen (Sporen, Staub) durch Regen, Nebel oder Tau. Durch Versuche an z.B. glatten Oberflächen wie der Rotbuche konnte der Zusammenhang zwischen rauer Oberfläche, reduzierter Partikeladhäsion und Wasserabweisung gezeigt werden, womit der Selbstreinigungsprozess vieler Pflanzenoberflächen erkannt wurde (NEINHUIS & BARTHLOTT 1997b). Bei der Selbstreinigung werden kontaminierte Partikel entweder von einem Wassertropfen aufgenommen, oder sie haften an der Tropfenoberfläche. Es gibt zwei Gruppen von wasserabweisenden Blättern: 1.) die immer wasserabweisend sind und 2.) die nur saisonal Wasser abweisend sind, bevorzugt während des Blattaustriebs. Der Kontaktwinkel liegt bei allen Spezies zwischen 150-160°. Unter den Bäumen sind die Blätter von *Ginkgo biloba* und *Robinia pseudoacacia* besonders wasserabweisend (NEINHUIS & BARTHLOTT 1997a).

Die besonders niedrigen gemessenen Staubaufträge bei *Robinia pseudoacacia* von nur $0,08 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,02 \text{ PM}_{10}$ und $\text{PM}_{2.5}$ standen somit höchst wahrscheinlich mit

der geringen Benetzbarkeit und der wasserabweisenden Eigenschaft in Verbindung. Zudem waren die Blattflächen der Robinie nur äußerst spärlich mit wenigen Einzelhaaren versehen, so dass dies ebenfalls die geringe Staubbinding bedingte (Abb. 20).

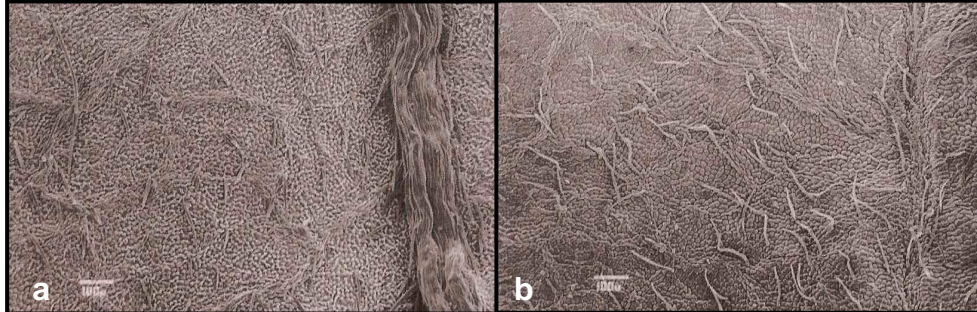


Abb. 20: Blattflächen von *Robinia pseudoacacia*. (a) Blattunterseite (b) Blattoberseite, beide Seiten mit wenigen vereinzelt Einzelhaaren (WESTERKAMP & DEMMELMEYER 1997)

Unter den untersuchten Spezies wurden zwei Arten der Eiche ausgewählt, die ein sehr unterschiedliches Staubbefangvermögen aufzeigten. Zum einen wurde *Quercus robur* als autochthones Gehölz beprobt, zum anderen *Quercus rubra* als beliebter Stadt- und Parkbaum. Innerhalb der gleichen Gattung wurde ein maximales, flächenbezogenes Feinstaubfangvermögen bei *Quercus rubra* von $1,33 \pm 0,18$ mg/cm² PM₁₀ und bei *Quercus robur* von $0,19 \pm 0,07$ mg/cm² PM₁₀ gemessen. Beide Arten waren auf der Blattoberseite als auch auf der Blattunterseite locker mit Einfach- und Bündelhaaren besetzt.

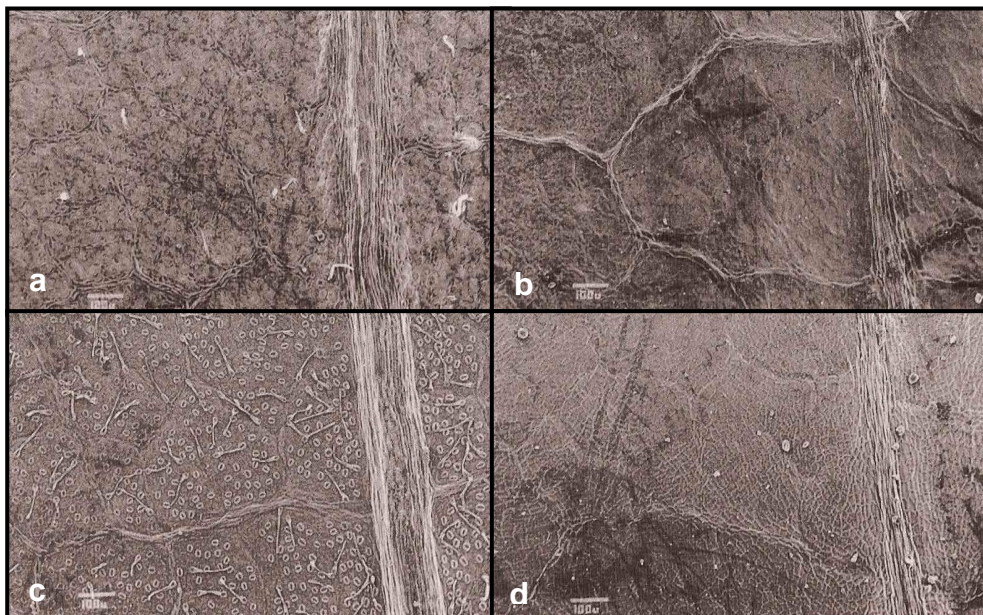


Abb. 21: Blattoberflächen von *Quercus rubra* (a) Blattunterseite (b) Blattoberseite mit sehr vereinzelt Einfach- und Bündelhaaren und *Quercus robur* (c) Blattunterseite (d) Blattoberseite mit vereinzelt Einfach-, Bündel- und Köpfchenhaare (WESTERKAMP & DEMMELMEYER 1997)

Die Oberflächen der Eichenblätter waren besonders glatt (Abb.21) und vermochten deshalb nur eine verhältnismäßig geringe Staubmenge zu binden. Zudem waren sie im juvenilen Stadium mit Wachs bedeckt und wasserabweisend. An reifen Blättern erodierten die Wachse, sodass ausdifferenzierte Eichenblätter Partikel stärker akkumulierten (NEINHUIS & BARTHOLOTT 1997a). Die Blattoberflächen von beiden *Quercus* Gattungen wiesen ganzflächig auffällige Wachskristalloide (Schuppen) auf (WESTERKAMP & DEMMELMEYER 1997).

Oftmals sind gerade die Blätter von *Quercus* und *Tilia* Arten stark mit Honigtau benetzt. Der meist auf den Blattoberseiten zu findende klebrige Saft führt zu einem deutlich erhöhten Staubauftrag, da Partikel eingeschlossen werden können (HELBING 1973). In welchem Umfang Honigtau auf Blättern zu finden ist, hängt von den Insekten, vorwiegend Blattläuse, Schildläuse und Zikaden ab. Finden sie optimale Lebensbedingungen vor, kann das zuckerhaltige Ausscheidungsprodukt der Insekten einen dicken Film auf Blättern und auch anderen Oberflächen bilden (parkende Autos unter Linden). Da dies jedoch sehr starken natürlichen Schwankungen unterlegen ist, ist eine Quantifizierung des durch Honigtau verursachten Staubauftrages nicht exakt möglich.

Bei den hier durchgeführten Arbeiten wurden die Proben vor der Bestäubung gereinigt, zudem waren die Probenbäume der Eichenarten nahezu Honigtau frei, so dass keine Verfälschung der Ergebnisse zu erwarten war.

Auf Blättern natürlich vorkommende biogene Organismen, wie beispielsweise der Eichenmehltau (*Microsphaera alphitoides*) (Abb. 22), beeinflussen die Oberflächenbedingungen auf einem Blatt, vergrößern die Oberfläche und verändern die Struktur und Morphologie des Blattes, so dass das Staubfangvermögen solcher kontaminierter Blätter erhöht sein dürfte.

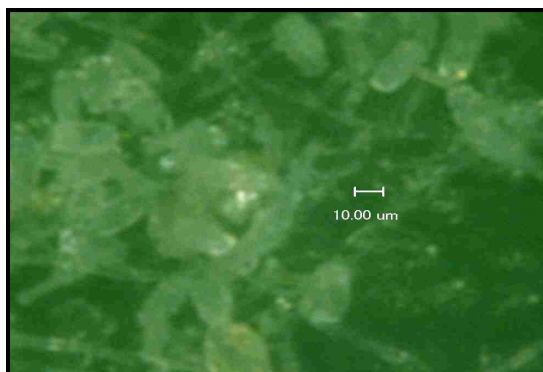


Abb. 22: Konidien und Hyphen des Eichenmehltau (*Microsphaera alphitoides*) auf einem Blatt von *Quercus robur*

Neben den im Rahmen dieser Arbeit erfassten Kenntnissen der Oberflächenbeschaffenheit der Blätter (Relief, Rauigkeit, Behaarung, Blattnervatur, Fiedrigkeit, Vorhandensein klebriger Drüsen) müssen ebenso weitere Parameter wie Blattrandwölbungen, Blattrandmorphologie, Oberflächenladungen und Benetzbarkeit in die Erwägungen mit einfließen (PFANZ et al. 2006).

Die Morphologie der Blattoberfläche (Haare, epikutikuläre Wachse) bestimmen die Benetzbarkeit. Steigt die Benetzbarkeit an, so kann das Blatt mehr durch Partikel kontaminiert werden (CROSSLEY & FOWLER 1986).

Die ausdifferenzierten Blätter von *Quercus rubra* waren im Durchschnitt 252 cm² groß, währenddessen die Blätter von *Quercus robur* eine viel kleinere Blattfläche von etwa 63 cm² aufwiesen. Da bei den Untersuchungen das gesamte Blatt bestäubt wurde und demnach Blattober- als auch Blattunterseite Staub fangen, entspricht die angegebene Blattfläche der Summe von Blattober- und -unterseite. Der quantitativ signifikante Unterschied des Staubauftrages könnte mit der deutlich größeren Oberfläche der Blätter von *Quercus robur* zusammenhängen, da die Blattgröße mit entscheidend für das Staubfangvermögen ist. Die größere Blattspreite und Blattrauigkeit bedingt eine größere windberuhigte Zone in der Staub absinken und haften bleiben kann. Das um das zehnfach höhere Staubfangvermögen von *Quercus rubra* gegenüber *Quercus robur* lässt sich anhand dem Vorhandensein von Behaarung nicht erklären, da beide Gattungen nur sehr spärlich behaart sind. Eine Erklärung für das deutlich erhöhte Fangvermögen liegt vermutlich in der unterschiedlichen Morphologie der Blattnervatur. Bei *Quercus rubra* traten die Blattadern deutlicher hervor und bildeten somit Widerstände an der ansonsten eher glatten Oberfläche, so dass in diesem Bereich Staub binden konnte (Abb. 21 a, b).

An diesem Beispiel zeigte sich, dass noch weitere, teils noch nicht ausreichend verstandene Parameter das Staubfangvermögen beeinflussen.

Der Blattflächenindex (BFI, LAI) und die Belaubungsdichte haben als Maß für die auffangende Blattfläche einen großen Einfluss auf das Staubfangvermögen (LANGNER 2002, LARCHER 2001, NORRA 1997, SCHRETZENMAYR & ULLRICH 1979), ebenso der Insertionswinkel sowie die Blattstellung in der Krone. Die Länge des Blattstieles, der Skleromorphiegrad der Blattspreite (Starrheit) und die damit einhergehende Windbeweglichkeit müssen hier weiterhin genannt werden (FLOHR & PFANZ 2007). Nadeln von Koniferen verharren bei einer Windbewegung überwiegend in einer starren Haltung, währenddessen Blätter der Laubbäume sich bewegen, so dass der Staub abfallen kann. Die Ergebnisse von BECKETT et al. (2000b) zeigten,

dass besonders Koniferen signifikant höhere Ablagerungsgeschwindigkeiten als auch Filterwirkung aufwiesen. Etwa bis zu einer Windgeschwindigkeit von 10 m/s wirkte sich der Wind positiv auf die Filterkapazität aus und ebenso wurde eine erhöhte Ablagerungsgeschwindigkeit festgestellt. Koniferen weisen aufgrund ihrer kleineren Blätter und komplexeren Zweigstrukturen ein höheres Staubfangvermögen auf als Laubbäume, besonders im Bereich kleiner 1 μm (FREER-SMITH et al. 2005).

Neben einer dichten Behaarung eines Blattes bestimmen auch die physiko-chemischen Eigenschaften der Oberfläche das Staubfangvermögen. Die Kutikula besteht aus löslichen Lipiden, die in eine Polyester matrix (Cutin-Matrix) eingebettet ist und als Akkrustierung die Epidermisaußenwand überzieht. Aufgrund ihrer chemischen Zusammensetzung bildet sie meistens eine hydrophobe Oberfläche (HOLLOWAY 1994). Die Kutikula bleibt zeitlebens wachstumsfähig und regeneriert sich bei Bedarf. Einige Beispiele für die vielgestaltige Ausprägung epikutikulärer Wachse sind in Abbildung 23 dargestellt.

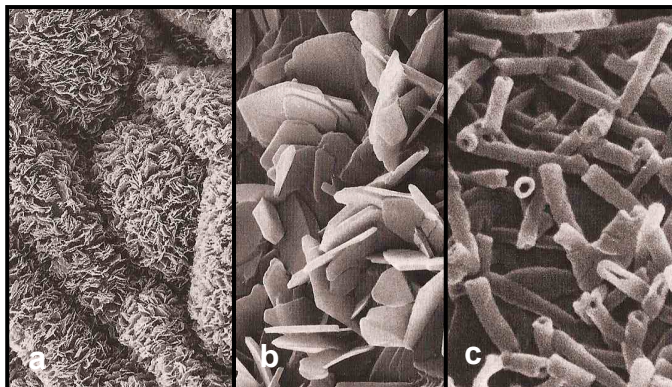


Abb. 23: Epikutikuläre Wachse: (a) aggregierte Wachsplättchen von *Hypericum buckleyi*, (b) Wachsplättchen bei *Leycesteria chartacea*, (c) Wachsröhrchen bei *Lonicera tatarica* (SITTE et al. 1999)

Ein besseres Festhalten von Partikeln auf Pflanzenoberflächen kann auch auf einer verstärkten Exkretion von Sekundärstoffen (Terpenen) beruhen, da die klebrigen Harze eine außerordentliche hohe Haftwirkung für Staub besitzen. An *Pinus* Sträuchern wurden deutlich harzigere Nadeln an immissionsbelasteten Standorten als an weniger belasteten festgestellt (STEUBING & KLEE 1970).

Dass sich Partikel besonders gut in dichter Behaarung festhalten, bestätigten die Ergebnisse. Dort wo im adulten Stadium, nach abgeschlossener Differenzierung, eine meist nur noch an den Hauptnerven vorkommende Behaarung zu finden war,

zeigte sich, dass dort die meisten Partikel haften blieben. Hier fanden sich die meisten Partikel auf den Hauptnerven, Mittelrippe und dem Mittelteil des Blattes (Bsp. *Viburnum lantana*, Abb.25). Das gleiche galt für nur wenig behaarte Spezies, die wenigen Haare fanden sich größtenteils auch hier auf den Hauptnerven (Bsp. *Parthenocissus tricuspidata*, Abb. 24) und kaum auf den Blattspreiten.

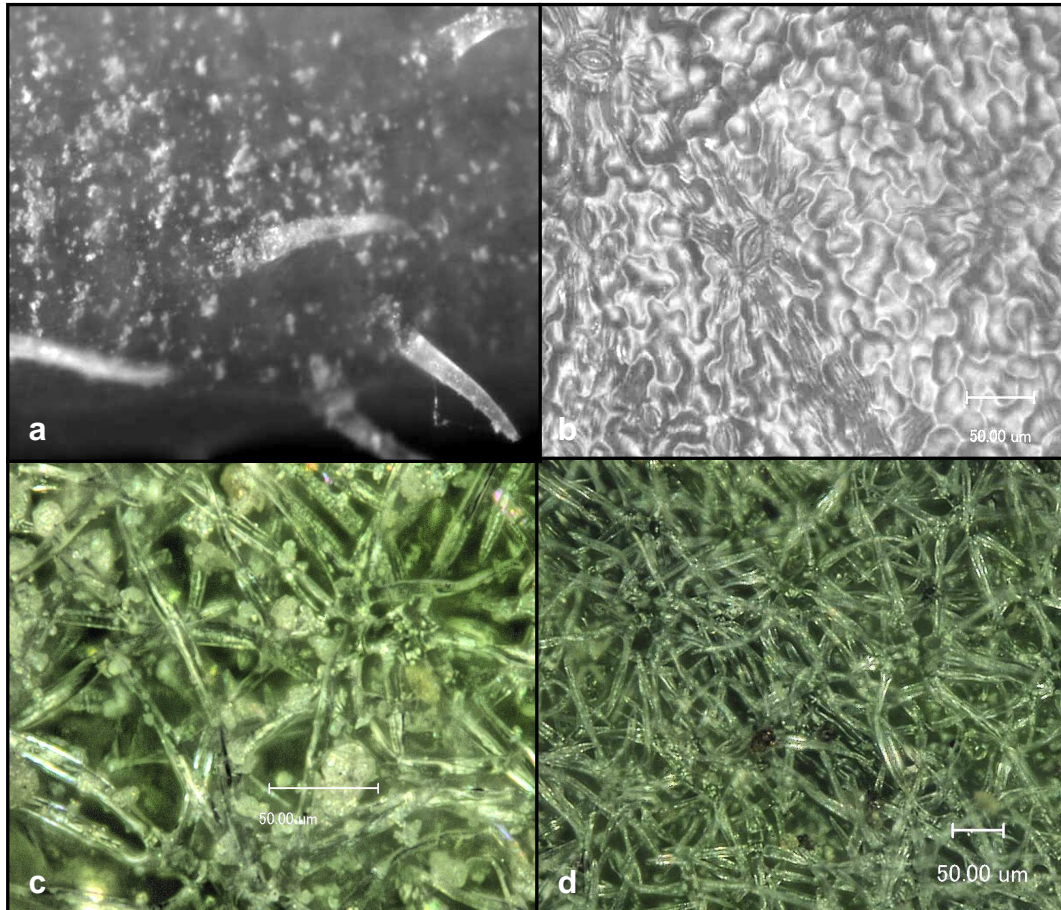


Abb. 24: Blattoberflächen von *Parthenocissus tricuspidata* (a) Ausschnitt des Hauptnervs mit Einfachhaaren auf der Blattunterseite bestäubt mit Feinstaub, (b) Blattoberseite ohne Behaarung. *Lavandula angustifolia* (c) Blattoberseite mit dichter filziger Behaarung, bestäubt mit Feinstaub (d) Blattunterseite mit Bündel- und Köpfchenhaare mit ätherischen Ölen.

Blieb eine flächige filzige Behaarung über die Maturation hinaus bestehen, so banden sich die Partikel flächig an das ganze Blatt (Bsp. *Lavandula angustifolia* Abb. 24). Partikel waren zudem auch in tieferen Schichten der Behaarung zu finden, sie schienen sich dort anzureichern (Abb.24, c).

Blätter mit einem großen Umfang/Fläche Verhältnis sind sehr effektive Fänger (SMITH 1990). Blattbehaarung insbesondere mit Drüsenhaaren wirkt sich günstig auf die Filterleistung von Grobstaub aus (SCHRETZENMEYER & ULLRICH 1979). Eingesenkte Blattnerven sind bevorzugte Ablagerungsstellen für Staubteilchen. Auf Blättern mit nach oben gewölbten Blatträndern, die konkave Blattoberflächen aufweisen (z.B.

Fiederblättchen bei *Sambucus nigra*) liegen die angekommenen Staubteilchen relativ windgeschützt.

Arten, deren Blätter annähernd waagrecht abstehen, weisen immer ein höheres Staubfangvermögen auf als mehr oder minder hängende, senkrecht zum Luftstrom angeordnete Blätter. Letztere fungieren hauptsächlich als Abprallflächen für Staubteilchen, die deren Sedimentation fördern (SCHRETZENMEYER & ULLRICH 1979).

Da die Ablagerungsgeschwindigkeit für Aerosolpartikel bei Nadelbäumen doppelt so hoch ist wie bei Laubbäumen, sind Koniferen einer stärkeren Deposition von Aerosolpartikeln ausgesetzt, wobei ihre Nadeln anscheinend als dauerhafte Senke der kleinsten Aerosolteilchenfraktion wirken (KETELSEN & KNÖCHEL 1985).

Innerhalb einer dichten Behaarung schien die Anzahl von in einem Bündel zusammengefassten Haaren ausschlaggebend für die Bindefähigkeit zu sein. *Viburnum rhytidophyllum* und *Buddleja davidii* waren beide besonders dicht auf der Blattunterseite mit Bündelhaaren besetzt (Abb.25), die sich auf Hauptnerven, Nervenachseln und untergeordneten Nerven verteilten. Die Bündelhaare des Schmetterlingsfliederes setzten sich nur aus 4 Einzelhaaren zusammen, die max. 350 µm lang wurden, währenddessen der Runzelblättrige Schneeball 20-40 Haare von einer Länge bis max. 500 µm aufwies. Der Einfluss einer solchen Behaarung konnte bei diesen beiden Arten eindrucksvoll belegt werden. Einen höchst signifikanten hohen maximalen Feinstaubauftrag des Gesamtblattes erzielte *Viburnum rhytidophyllum* mit $9,76 \pm 2,59 \text{ mg/cm}^2$ und *Buddleja davidii* mit $1,41 \pm 0,36 \text{ mg/cm}^2$. Unter den untersuchten Arten waren diese behaarten Spezies besonders gute Staubfänger, die ein hohes Bindevormögen über 1 mg/cm^2 aufwiesen.

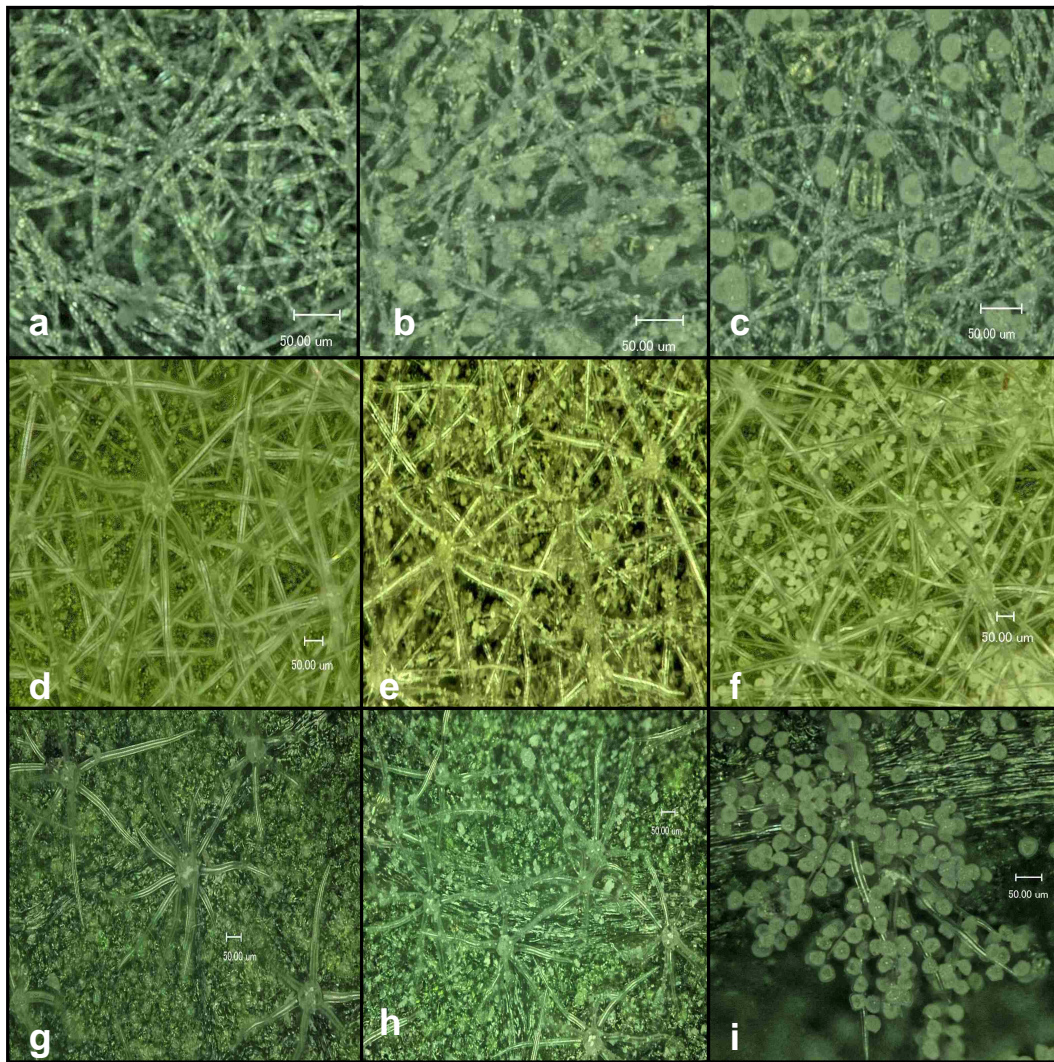


Abb. 25: Blattflächen verschiedener Pflanzen. (a-c) Blattunterseite von *Phlomis fruticosa* (a) Bündelhaare (b) bestaubt mit Feinstaub (c) bestaubt mit Mittelstaub; (d-f) Blattunterseite von *Viburnum lantana* (d) Büschelhaare (e) bestaubt mit Feinstaub (f) behaarter Blattnerve mit Mittelstaub bestaubt; (g-i) Blattunterseite von *Buddleja davidii* (g) Einfachhaare (h) bestaubt mit Feinstaub (i) bestaubt mit Mittelstaub

Dichte Einfachbehaarung, wie sie beispielsweise bei *Ribes sanguineum* zu finden war, schien eine ähnlich hohe Staubbindung zu bedingen, wie es bei dichter Bündelbehaarung der Fall war (Abb. 25). Bei der Zierjohannisbeere ließen sich zudem eine Vielzahl von Köpfchenhaaren (Drüsenhaare) finden, die durch die Absonderung klebriger Substanzen das Staubbindevermögen deutlich erhöhten (Abb. 26).



Abb. 26: Köpfchenhaar von *Ribes sanguineum* (FROHNE & PFÄNDER 1997)

Auf der Blattunterseite der Zierjohannisbeere konnten signifikant höhere Staubmengen aller Kornfraktionen gemessen werden, was mit der dichteren Verteilung von Einfach- und Drüsenhaaren auf der Blattunterseite zu erklären war (Tab.14).

Zeigten Blätter nur eine spärliche Behaarung auf, genauer nur lockere Einzelhaare, so banden diese Blätter auffällig weniger Staub. Dies konnte am Beispiel der Rotbuche gezeigt werden, die zwar mit max. 3000 μm sehr lange Haare aufwies, diese aber nur locker und vereinzelt auf beiden Blatthälften verteilt waren. Juvenile Blätter von *Fagus sylvatica* wiesen eine ausgeprägte Schutzbehaarung auf (siehe Kap. 3.1.1.1.4). Diese verlor sich während der Maturation, sodass nur noch eine lockere Einfachbehaarung bei ausdifferenzierten Blättern übrig blieb. Insgesamt erklärte sich daraus das sehr niedrige Staubindevermögen aller Kornfraktionen.

Die Büschelhaare von *Viburnum lantana* starben im Alter ab, verfielen und verfilzten dicht (BURKHARDT 1912). Die Blätter erschienen weißfilzig behaart, besonders der Mittelnerv als auch die stärker hervortretenden Nerven. Die vielen schlanken, geraden bis leicht gewundenen Bündelhaare saßen einem in der Länge variablen Stiel auf (Abb.25). Da die Blätter von *Viburnum lantana* ein großes Flächenwachstum durchlebten, waren ältere Blätter nur auf den Hauptnervensträngen der unteren Epidermis dicht behaart, währenddessen auf der oberen Epidermis und den schwächeren Nerven die Haare weit auseinandergerückt waren (LABER 1954).

Das Vorhandensein einer dichten Behaarung (Abb.25) bedingte bei *Viburnum lantana* das Staubfangvermögen von $1 \pm 0,27 \text{ mg/cm}^2 \text{ PM}_{10}$ und $0,41 \pm 0,13 \text{ mg/cm}^2 \text{ PM}_{2.5}$, da die Behaarung jedoch im Zuge der Maturation verloren ging, wurde kein höherer Wert erreicht, den man aufgrund des dichten Haartyps erwartet hätte.

Die graufilzigen Blätter von *Althaea officinalis* (Echter Eibisch) waren dicht mit aus Einzelhaaren zusammengesetzten Büschelhaaren besetzt, die unregelmäßig und eher borstenartig aussahen (GASSNER 1973). Blattober- und -unterseite waren gleich verteilt behaart, zudem ließen sich kurzgestielte Drüsenhaare mit mehrzelligem, tonnenförmigen Köpfchen finden. Der Echte Eibisch zählte unter den untersuchten Arten mit zu den besten Staubfängern. PM_{10} und $\text{PM}_{2.5}$ Auflagerungen von nahezu 2 mg/cm^2 wurden gefunden.

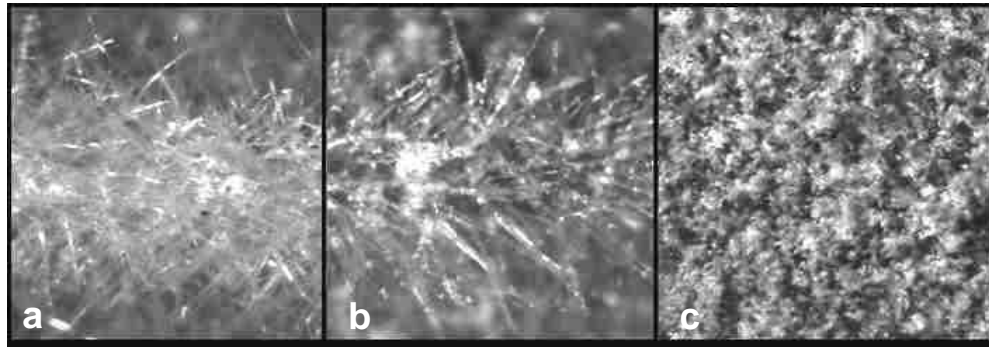


Abb. 27: Blattoberflächen von *Althaea officinalis* **(a)** Blattunterseite, Hauptnerv mit dichten Büschelhaaren, **(b)** mit Feinstaub bestaubter Hauptnerv, **(c)** Blattoberseite bestaubt mit Feinstaub, (a) und (b) 50fache Vergrößerung, (c) 25fache Vergrößerung

Die sehr dichten Büschelhaare von *Althaea officinalis* (Abb.27a) ergaben ein dichtes Geflecht in dem Feinstaub hängen blieb (Abb.27 b). Feine Partikel legten sich um die Haare herum und in die Haarzwischenräume. Aufgrund der beidseitigen starken Behaarung fand sich auch hier ein rundherum hoher Staubauftrag. Die feinen Partikel bildeten Agglomerate und lagerten sich in den Zwischenräumen ab (Abb.27 c).

Die Blattfläche von *Salvia officinalis* (Salbei) war oberseits runzelig-höckerig, auf der Blattunterseite war sie grubig. Bei jungen Blättern waren beide Blathälften stark filzig behaart, währenddessen bei älteren Blättern nur noch die Nerven behaart waren. Auf beiden Seiten fanden sich lange Gliederhaare in großer Zahl (Abb. 28), daneben kreisförmige Drüsenschuppen und kleine Drüsenhaare mit kugeligen Köpfchen (GASSNER 1973).

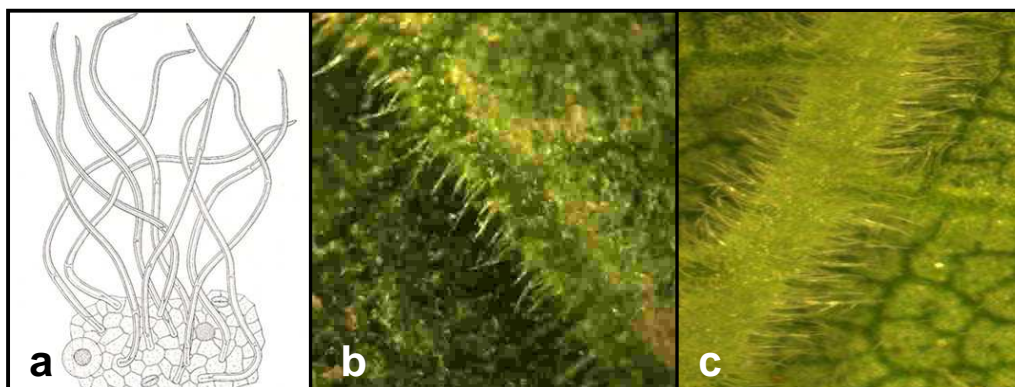


Abb. 28: Blattbehaarung von *Salvia officinalis* **(a)** Einzelhaare und Drüsenschuppen, GASSNER 1973; **(b)** mit Feinstaub bestaubte Haare der Blattunterseite, 25-fache Vergrößerung, eigene Darstellung; **(c)** Einzelhaare der Hauptnerven auf der Blattunterseite, 25-fache Vergrößerung eigene Darstellung

Unter den untersuchten Arten zeigte sich, dass jene Arten mit exkretionsreichen Drüsen in Kombination mit einer allgemein starken Behaarung relativ hohe Staub-

aufträge aufwiesen. Insgesamt wiesen nur 15 % der 82 untersuchten Arten ein höheres maximales, flächenbezogenes Staubfangvermögen von größer als 1 mg/cm² auf. Salbei zählte mit einem Staubfangvermögen von $1,31 \pm 0,17$ mg/cm² PM10 und $0,72 \pm 0,11$ mg/cm² PM2.5 somit zu den besseren Staubfängern. Da ebenso wie bei *Viburnum lantana* im Alter die Behaarung abnahm und nur noch verstärkt an den Hauptnerven zu finden war, wurden trotz sehr starker Behaarung keine höheren Werte erzielt.

Die Blattoberfläche von *Calathea rufibarba*, einer beliebten Zimmerpflanze, fühlte sich bei Berührung der Blätter sehr weich behaart an, diese Behaarung ließ sich makroskopisch bereits erfassen. Bei näherer Betrachtung fielen die langen Einfachhaare auf, die zwar flächig und recht dicht vorhanden waren, jedoch sehr große Zwischenräume bildeten (Abb. 29). Nach Bestäubung fiel auf, dass die einzelnen Haare von Staub umgeben waren, sich zwischen den Haaren jedoch nur mäßig bestaubte Flächen fanden. Die gemessenen Werte für *Calathea rufibarba* waren mit $0,4 \pm 0,03$ mg/cm² PM10 und $0,23 \pm 0,03$ mg/cm² PM2.5 nur mittelmäßig. Die höchsten gemessenen Werte lagen bei fast 10 mg/cm² beim Runzelblättrigen Schneeball (Tab.14). An diesem Beispiel zeigte sich erneut, dass die Dichte der Haare eine sehr bedeutende Rolle im Staubfangvermögen von Blattoberflächen spielt.

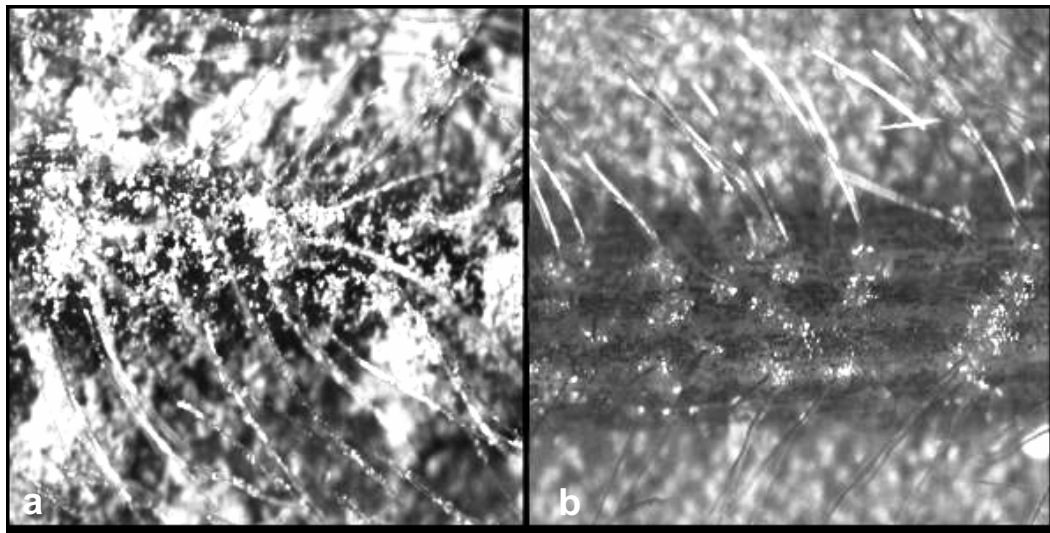


Abb.29: Hauptnerv der Blattunterseite von *Calathea rufibarba* (a) bestaubt mit Feinstaub und (b) unbestaubte Kontrolle 50-fache Vergrößerung

Große Oberflächenrauigkeit begünstigte die Effektivität bei Partikeln im Bereich 5 µm und kleiner (HENNEBO 1955). Weiche Blätter wie z.B. bei *Aesculus hippocastanum* waren nicht so effektiv wie raue Blätter bei z.B. *Corylus avellana*. Hier wurden für *Aesculus hippocastanum* Werte von $0,24 \pm 0,08$ mg/cm² PM10 und PM2.5 und für

Corylus avellana deutlich höhere Werte von $1,12 \pm 0,27 \text{ mg/cm}^2$ PM10 und $0,76 \pm 0,15 \text{ mg/cm}^2$ PM2.5 gemessen, die diese Theorie bestätigten.

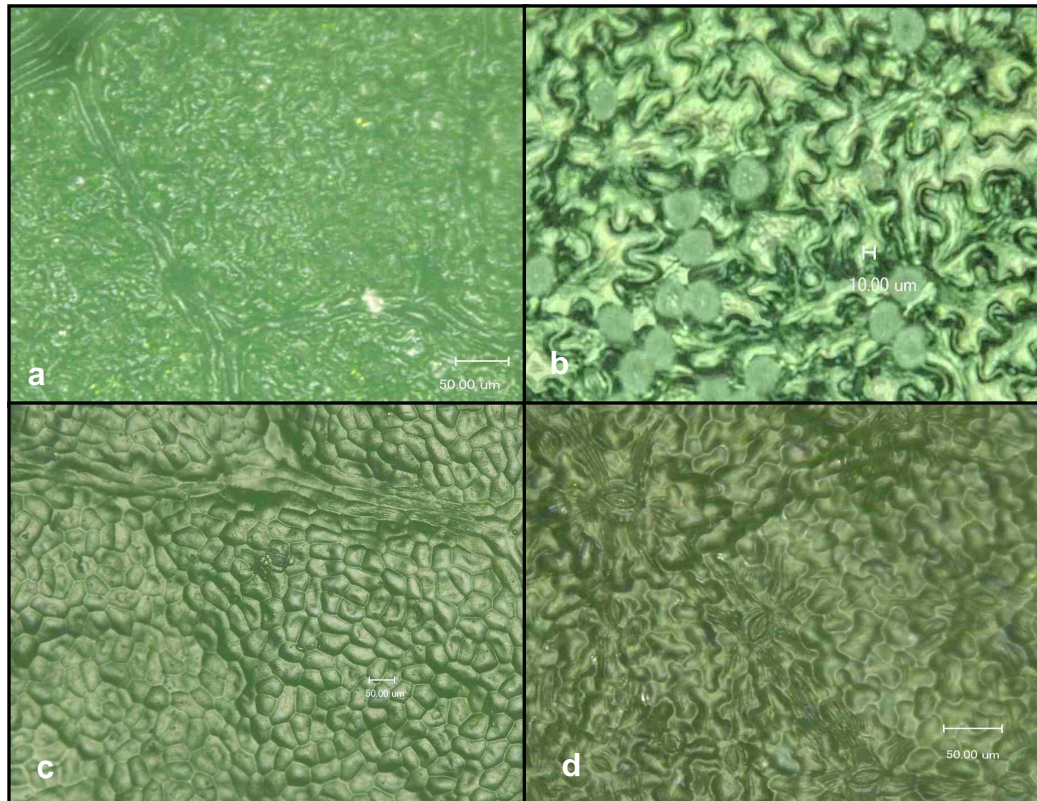


Abb. 30: glatte, unbehaarte Blattflächen verschiedener Pflanzen (a) Blattoberseite von *Carpinus betulus* (b) Blattunterseite von *Clematis vitalba* bestäubt mit Mittelstaub (c) Blattoberseite von *Parthenocissus tricuspidata* (d) Blattunterseite von *Parthenocissus tricuspidata*

Blattstrukturen ohne nennenswerte Behaarung wie sie bei *Carpinus betulus*, *Clematis vitalba* und *Parthenocissus tricuspidata* gezeigt wurden (Abb.30), wiesen wie erwartet die geringsten Staubaufträge unter den untersuchten Arten auf. *Clematis vitalba* mit nur minimalen Aufträgen von $0,05 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$ für PM2.5 als auch PM10 erzielte unter allen beprobten Arten das geringste Staubfangvermögen. Die Oberfläche war sehr glatt, so dass sich Partikel nur schwerlich halten konnten. Die wenigen Partikel lagen vereinzelt verteilt auf der Blattfläche vor (Abb. 30b). Die sehr glatte Ober- als auch -unterseite von *Parthenocissus tricuspidata* bot Partikeln ebenfalls eine ungünstige Oberfläche, so dass auch hier nur geringe Mengen von $0,13 \pm 0,05 \text{ mg/cm}^2$ für PM10 und $0,12 \pm 0,03 \text{ mg/cm}^2$ für PM2.5 bestimmt werden konnten.

Parthenocissus tricuspidata zählt nach der Einteilung von THÖNNESSEN (2002) zu den Akkumulierern, d.h. die Blattoberflächen werden durch Regenereignisse nicht gereinigt und Partikel sammeln sich während der Vegetationsperiode auf Oberflächen an. Trotz dieser Strategie konnte im Rahmen dieser Untersuchung nur

ein sehr geringes Staubfangvermögen für die Feinstäube PM10 und PM2.5 erzielt werden.

Eine andere Strategie zeigte sich bei *Platanus x hispanica*, deren Blattoberfläche durch Regenereignisse gereinigt wurde (Avoider).

Filterleistungen von Wildem Wein wurden für verschiedene Metalle (Pb, Cd, Cu, Zn) untersucht, wobei eine Filterleistung je m² begrünter Fassadenfläche berechnet wurde, die einer Reduktion für Pb von 18 %, Cd 39,5 %, Cu 80 % und Zn von 16,5 % pro Vegetationsperiode entsprechen (THÖNNESSEN 2005). Diese Metalle wiesen eine durchschnittliche Größe von 0,1-0,5 µm auf (FOWLER et al. 1999) und zählten somit zu den Feinststäuben (LAHMANN 1990). Für diese Kleinstpartikel schien somit der Wilde Wein eine geeignete Senke zu sein, währenddessen die im Rahmen dieser Arbeit bestimmten Fein- als auch Mittelstaubpartikel nur mäßig bis kaum abgelagert wurden.

3.1.1.1.3 Untersuchungen an Blattober- und -unterseiten

Exemplarisch wurde an ausgesuchten Spezies das Staubfangvermögen unterschieden nach Blattober- und -unterseite untersucht, um eventuelle Differenzen bezüglich der verschiedenen Blattflächen herauszuarbeiten.

Allgemein zeigte sich, dass bei dem überwiegenden Teil der untersuchten Spezies auf den Blattunterseiten mehr Staub haften blieb als auf den Blattoberseiten (Tab. 15). Bei 8 von 10 Arten wurden im Mittel zwischen 50 und 80% des Mittelstaubes, zwischen 46 und 93% des Feinstaubes PM10 und zwischen 40 und 92% des Feinstaubes PM2.5 auf den Blattunterseiten gebunden.

Auf den Blattoberseiten fanden sich für alle Kornfraktionen geringere prozentuale Anteile, im Mittel unter 60%. Betrachtete man die Verteilung der einzelnen Staubfraktionen auf den Blattoberseiten so fiel auf, dass bei den meisten untersuchten Arten der prozentuale Anteil beim Mittelstaubauftrag erhöht war (Bsp. *Tilia tomentosa*, *Fagus sylvatica*). Ausnahmen hierbei waren *Ribes sanguineum* und *Calathea rufibarba*, bei denen auf den Blattoberseiten prozentual am besten Feinstaub (PM2.5) gebunden wurde.

Auf den Blattunterseiten wurde insgesamt der meiste Staub gebunden, verstärkt die Feinstäube PM10 und PM2.5. Hier wurden bis zu 93% des Feinstaubes PM10 auf der Blattunterseite fixiert.

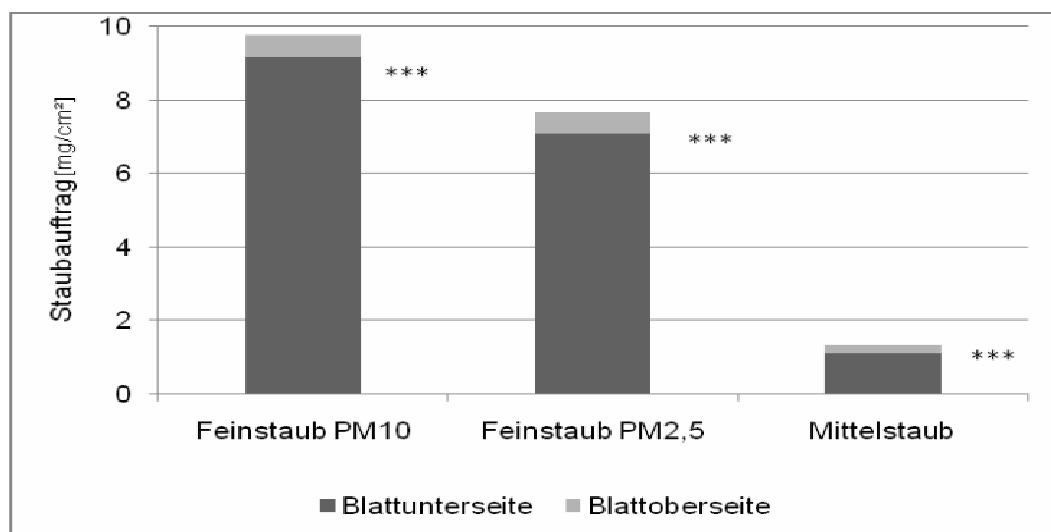


Abb. 31: Maximaler Staubauftrag verschiedener Kornfraktionen der Blätter (n=25) von *Viburnum rhytidophyllum* differenziert nach Blattober- und -unterseite. Die Unterschiede im maximalen Staubauftrag zwischen Blattober- und -unterseite sind höchst signifikant (***)

Tab. 15: Das maximale, flächenbezogene Staubfangvermögen (Mittelstaub, PM10 und PM2.5) [mg/cm²] von Blättern differenziert nach Blattober- und -unterseite diverser Pflanzenspezies. Dargestellt ist der Mittelwert (n=25) und SD sowie der prozentuale Anteil des Gesamtstaubes auf der jeweiligen Blattseite.

	Blattoberseite						
	Mittelstaub	SD	% Gesamtstaub	Feinstaub	SD	Feinstaub	% Gesamtstaub
	30µm			PM10		PM2.5	
<i>Calathea rufibarba</i>	0,08	0,01	36,36	0,19	0,04	0,11	0,03
<i>Corylus colurna</i>	0,21	0,05	49,19	1,00	0,14	0,25	0,07
<i>Dracaena fragans</i>	0,21	0,03	56,76	0,24	0,03	0,09	0,02
<i>Dracaena marginata</i>	0,18	0,03	46,15	0,40	0,06	0,13	0,05
<i>Fagus sylvatica</i>	0,11	0,03	68,75	0,14	0,05	0,10	0,02
<i>Quercus rubra</i>	0,07	0,01	46,48	0,45	0,07	0,38	0,14
<i>Ribes sanguineum</i>	0,19	0,04	29,69	1,21	0,16	1,12	0,12
<i>Sorbus intermedia</i>	0,27	0,07	19,71	0,40	0,06	0,19	0,04
<i>Tilia tomentosa</i>	0,17	0,03	42,71	0,50	0,03	0,45	0,03
<i>Viburnum rhytidophyllum</i>	0,24	0,05	17,91	0,60	0,09	0,55	0,11
	Blattunterseite						
	Mittelstaub	SD	% Gesamtstaub	Feinstaub	SD	Feinstaub	% Gesamtstaub
	30µm			PM10		PM2.5	
<i>Calathea rufibarba</i>	0,14	0,04	63,64	0,21	0,03	0,12	0,05
<i>Corylus colurna</i>	0,22	0,03	50,81	0,86	0,17	0,42	0,06
<i>Dracaena fragans</i>	0,16	0,02	43,24	0,21	0,03	0,07	0,02
<i>Dracaena marginata</i>	0,21	0,03	53,85	0,24	0,03	0,09	0,03
<i>Fagus sylvatica</i>	0,05	0,02	31,25	0,27	0,05	0,07	0,02
<i>Quercus rubra</i>	0,08	0,01	53,52	0,88	0,18	0,46	0,09
<i>Ribes sanguineum</i>	0,45	0,06	70,31	2,36	0,47	1,96	0,62
<i>Sorbus intermedia</i>	1,10	0,12	80,29	1,91	0,41	0,85	0,22
<i>Tilia tomentosa</i>	0,23	0,06	57,29	1,10	0,20	0,79	0,13
<i>Viburnum rhytidophyllum</i>	1,10	0,18	82,09	9,16	2,59	7,10	2,12

Am Beispiel des Runzelblättrigen Schneeballs wurden 93% des Feinstaubes (PM10 und PM2.5) und 82% des Mittelstaubes auf den Blattunterseiten festgehalten (Abb. 31). Diese Spezies zeichnete sich durch ein sehr hohes Feinstaubfangvermögen aus. Die Blätter von *Viburnum rhytidophyllum* wiesen eine starke Behaarung der Blattunterseiten auf, worauf das enorme Staubbangvermögen zurückzuführen war (Abb.32). Die Blattoberseiten hingegen waren nur mit einigen wenigen Haaren versehen. Tendenziell konnte an allen untersuchten Arten, die eine starke Behaarung auf der Blattunterseite aufwiesen, ein signifikant erhöhter Staubauftrag festgestellt werden (Tab. 15).

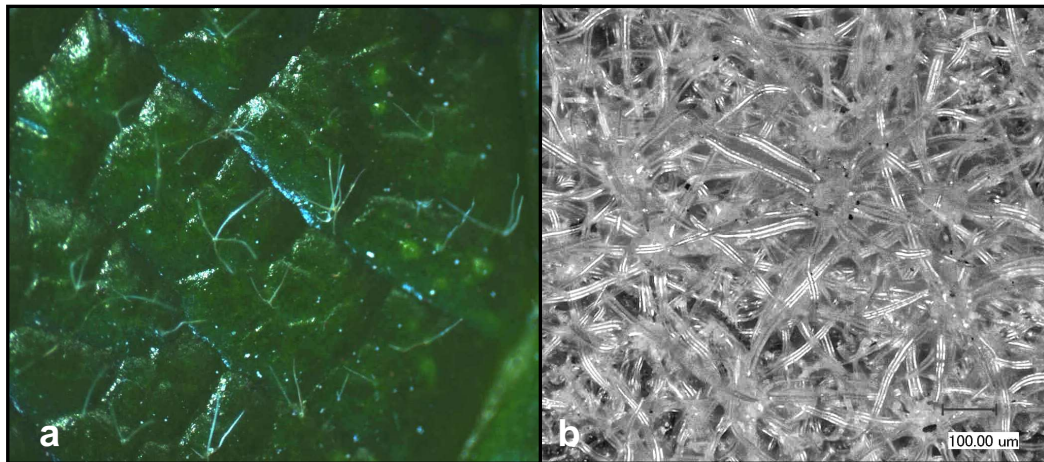


Abb. 32: Blatt von *Viburnum rhytidophyllum* (a) Blattoberseite mit einzelnen Haaren (b) Blattunterseite mit einer dichten Behaarung mit Bündelhaaren.

Die Unterschiede im Staubbangvermögen zwischen Blattober- und -unterseite waren von den morphologischen Eigenschaften der Blätter bestimmt.

Arten, die nahezu unbehaart waren, wiesen ein generell niedriges Staubbangvermögen auf. Die Verteilung des Staubes erfolgte jedoch auch hier bei der überwiegenden Anzahl der untersuchten Arten zu Gunsten der Blattunterseite. Die verschiedenen Korngrößen (Mittelstaub, Feinstaub PM10 und PM2.5) verhielten sich dabei sehr ähnlich, d.h. die Anteile des Gesamtstaubes auf der Blattunterseite waren erhöht (Tab.15).

Am Beispiel von *Dracaena marginata* wurde insgesamt sehr wenig Staub gebunden, was aufgrund der fehlenden Behaarung erwartet wurde (Abb. 33). Innerhalb des Gesamtstaubauftrages wurden im Feinstaubbereich PM10 eine leicht höhere Menge auf der Blattoberseite festgestellt, insgesamt war der Staubauftrag jedoch aufgrund der glatten Blattoberfläche eher gering. Die Blätter von *Dracaena marginata* sind stark längs gerieft (Abb. 34). In den tiefen Rillen lagerten sich besonders die kleinen Partikel (um 10 µm im Durchmesser) ab (Abb. 34a).

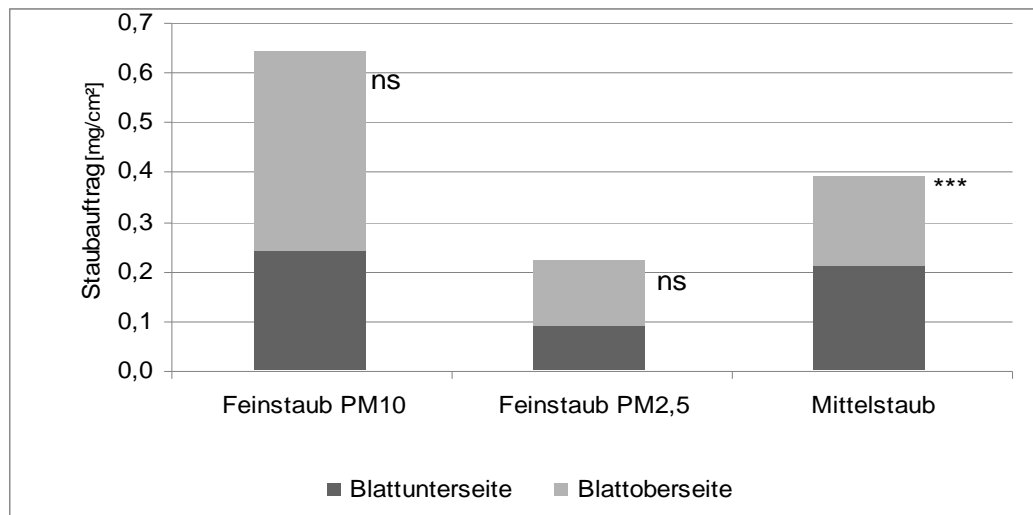


Abb. 33: Maximaler Staubauftrag verschiedener Kornfraktionen der Blätter (n=25) von *Dracaena marginata* differenziert nach Blattober- und -unterseite. Die Unterschiede im maximalen Staubauftrag zwischen Blattober- u. -unterseite sind höchst signifikant (***), signifikant (*) bzw. nicht signifikant (ns)

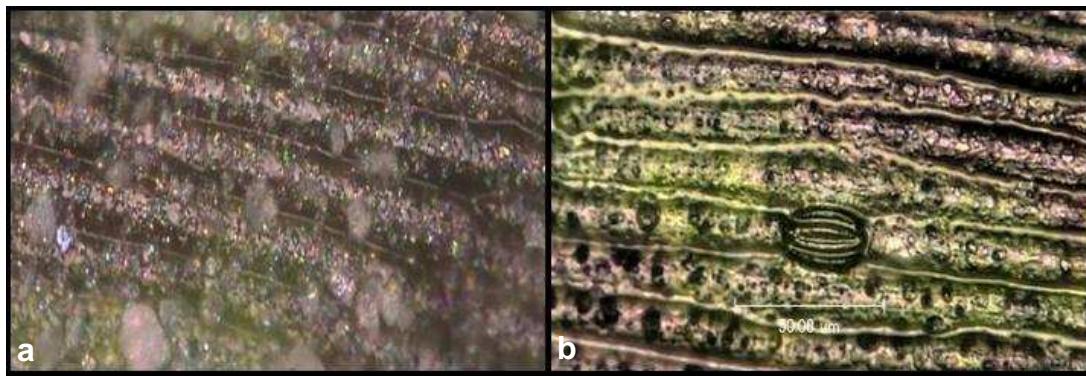


Abb. 34: Blattoberflächen von *Dracaena marginata* (a) mit Feinstaub bestaubt und (b) unbestaubte Kontrolle

Die kleinen Partikel im Bereich von PM2.5 wurden deutlich schlechter gebunden als die Feinstaubpartikel PM10. Dieser Anteil am Gesamtfangvermögen war sehr gering und eine signifikante Präferenz zur Blattunterseite war nicht gegeben.

An den glatten Oberflächen der beliebten Zimmerpflanze blieben verstärkt die gesundheitsschädlichen Feinstäube haften, was sicherlich für die Verbesserung des Raumklimas beitragen kann, wenn auch der maximale Anteil an Staub eher als gering einzustufen ist.

Die Blätter von *Quercus rubra* wiesen eine sehr glatte Oberfläche auf, die nur sehr vereinzelt mit wenigen Einzelhaaren versehen war. Dennoch zeigte sich bei dieser Spezies ein hohes Staubfangvermögen im Bereich der Feinstäube (PM10 und PM2.5). Auch auf diesen Blättern fanden sich prozentual mehr Partikel auf der Blattunterseite als auf der Blattoberseite (Abb. 35).

Die möglichen Gründe für das unterschiedliche Staubfangvermögen der Blattseiten lagen wahrscheinlich in der größeren Rauigkeit der Blattunterseite begründet, wo eine stark strukturierte Blattnervatur vorlag. Es gibt zudem Unterschiede innerhalb von Pflanzen, die von dem Vorhandensein von blattaufrauenden Strukturen (Blattadern, Trichome etc.) und der strukturellen Komplexität der Blätter und Zweige abhängen (BECKETT et al. 2000a).

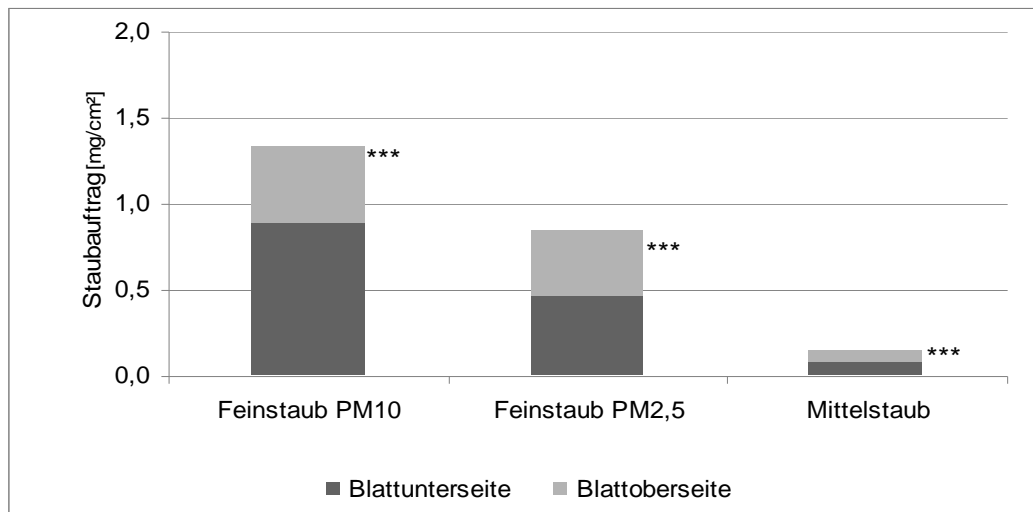


Abb. 35: Maximaler Staubauftrag verschiedener Kornfraktionen der Blätter (n=25) von *Quercus rubra* differenziert nach Blattober- und -unterseite. Die Unterschiede im maximalen Staubauftrag zwischen Blattober- u. -unterseite sind höchst signifikant (***)

Im Hinblick auf die räumliche Verteilung in der gesamten Vegetationsperiode wurden Partikel häufiger auf der Oberseite als auf der Unterseite gefunden (HEICHEL & HANKIN 1976). Blätter an Pflanzen sind meist so inseriert, dass sie optimal mit der natürlichen Sonnenstrahlung versorgt werden können. Sedimentiert der Staub von oben nach unten gelangen natürlicher Weise die Partikel überwiegend auf die Blattoberfläche. Durch Windbewegungen und Böen werden Blätter bewegt. Die Blätter von Straßenbegleitgrün werden stark durch die von vorbeifahrenden Kraftfahrzeugen verursachten Wirbelschleppen bewegt, so dass gerade an dieser Stelle die Blattunterseiten mit Staub impaktiert werden.

Oftmals wird in der Literatur die Gesamtblattfläche einfach angegeben, d.h. nicht nach Blattober- und -unterseite differenziert. Für Staubauflagerungen sind beide Blattseiten von großer Bedeutung, so dass dies bei Quantifizierungen beachtet werden muss.

Eine Staubauflagerung fand sich auf Ober- und Unterseite von Blättern. So ist es jedoch von verschiedenen Parametern, wie z.B. der Position des Blattes abhängig, auf welcher Seite mehr Staub haften bleibt (HELBING 1973). Eine ausgeglichene Verteilung des Staubes wurde auf Blättern von *Rhododendron catawbiense* festgestellt (ELLER & BRUNNER 1975), jedoch konnten auch höhere Partikelmengen auf der Blattunterseite von HELBING (1973) belegt werden.

Neben der Beobachtung, dass behaarte Pflanzenorgane ein tendenziell höheres Staubfangvermögen aufwiesen, schien weniger der Haartyp als die Anzahl und Dichte der Haare in diesem Zusammenhang von Bedeutung zu sein. So zeigten die Arten ein höheres Staubfangvermögen, die Einfach-, Köpfchen- oder Bündelhaare auf den Blattspreiten dicht verteilt aufwiesen, wie z.B. bei *Viburnum rhytidophyllum*, *Lagurus ovatus*, *Ribes sanguineum* und *Phlomis fruticosa* (Tab. 13). Die signifikanten Unterschiede im Staubfangvermögen zwischen Blattober- und -unterseite lagen darin begründet, dass die Blattunterseiten fast aller untersuchten Arten deutlich stärker behaart waren als die Oberseiten (Tab. 15).

Einen besonders guten Einfluss auf die Staubbindefähigkeit schien eine dichte Behaarung mit Bündelhaaren aufzuweisen, die sich meistens auf den Blattunterseiten befanden. Innerhalb dieser dichten Behaarung spielte die Anzahl der zusammengefassten Haare eine Rolle. Ein Beispiel für einen solchen Behaarungstyp war *Viburnum rhytidophyllum*, bei dem besonders hohe Staubmengen von den Blattflächen gebunden wurden, wobei über 82 % des Mittelstaubes, 94 % des Feinstaubes (PM₁₀) und 93 % des Feinstaubes (PM_{2.5}) auf der Blattunterseite fixiert wurde. Die Blätter von *Viburnum rhytidophyllum* waren auf der Unterseite besonders dicht mit Bündelhaaren versehen, wobei 20-40 Haare zusammen auf einem Sockel inseriert waren und die Einzelhaare eine Länge zwischen 90-500 µm aufwiesen (Tab. 13). Die Blattoberseite zeigte eine lockere Behaarung mit Bündelhaaren auf. In dem dichten, filzigen Netz aus Bündelhaaren (Abb. 36) hielten sich besonders gut die feinen Kornfraktionen, wobei sich diese in den Zwischenräumen als auch um die einzelnen Haare ablagerten. Die starke Behaarung der Pflanze auf der Blattunterseite, die der Erniedrigung der Transpirationsrate dienen soll, sorgte in diesem Bereich für einen windberuhigten Raum, in dem die feinen Partikel vermutlich sedimentieren konnten.

Der Feinstaub legte sich an die Haare an und bedeckte diese gänzlich (Abb. 36), die Verteilung der Partikel wirkte sehr homogen. In den Zwischenräumen der einzelnen

Bündelhaare sedimentierten größere Staubmengen und schienen zu agglomerieren. Möglicherweise begünstigte der natürliche Gaswechsel und die damit verbundene Wasserdampfabgabe eine Koagulation der feinsten Partikel.

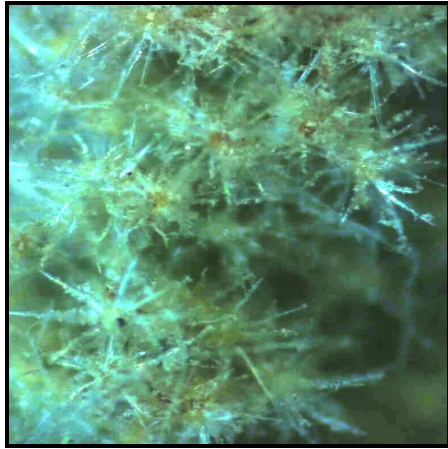


Abb. 36: Bündelhaare auf der Blattunterseite von *Viburnum rhytidophyllum* bestaubt mit Feinstaub, 50-fache Vergrößerung

Die Lokalisation (Blattober- und -unterseite) als auch Verteilung der Haare war neben dem Haartyp entscheidend für das Staubfangvermögen. Eine dichte, flächige Verteilung der Haare über die gesamte Blattspreite, inklusive auf Hauptnerven, Nervenachsen und untergeordneten Nerven erhöhte allgemein die Ablagerung von Staub, was u.a. an den Arten *Ribes sanguineum*, *Salvia officinalis* und *Phlomis fruticosa* gezeigt werden konnte, die alle dicht auf Blattober- und -unterseite behaart sind (Tab. 14). *Phlomis fruticosa* besitzt eine Reihe verschiedener Haartypen. Den größten Teil bilden jedoch Bündelhaare, die etwa 6 Wochen nach ihrer Anlage absterben und dann mit Luft erfüllt sind.

Unter den untersuchten Arten wiesen 11 Arten ein hohes Staubfangvermögen für PM 2,5 größer 1 mg/cm² auf. Die Arten sind *Viburnum rhytidophyllum*, *Lagurus ovatus*, *Ribes sanguineum*, *Sorbus intermedia*, *Phlomis fruticosa*, *Althaea officinalis*, *Tilia tomentosa*, *Holcus lanatus*, *Buddleja davidii*, *Geranium x magnificum* und *Weigelia middendorffiana*. Die genannten Arten waren im Allgemeinen gute Staubfänger aufgrund ihrer sehr stark behaarten Oberfläche. Im Bereich der Feinstaubfraktionen PM10 und PM2.5 wurden die Partikel tendenziell gleich gut auf den Blattflächen gebunden (Tab.14).

Die Ergebnisse lassen darauf schließen, dass Mittelstaubfraktionen eher oberflächenorientiert sind und durch Haare oder ähnliches geschaffene Räume benötigen, um auf Blattstrukturen haften zu bleiben. Bei den feineren Fraktionen PM10 und PM2.5 scheint es so zu sein, dass sich die Partikel an Haaroberflächen

binden. Daneben begünstigten natürlich Haare allgemein zusätzlich das Fangvermögen der Blattoberflächen in diesen feinen Korngrößen.

3.1.1.1.4 Staubfangvermögen in Abhängigkeit des Alters der Behaarung

Die Blattbehaarung kann sich im Laufe des Blattlebens verändern. Dies gilt auch für andere Pflanzenorgane wie junge Triebe und Knospen. Oftmals dient eine Behaarung in jungen Jahren dem Schutz der noch nicht ausdifferenzierten Gewebe und verliert sich bei der Maturation. Allgemein bleibt die Behaarung auf der Blattunterseite länger erhalten und dort genauer auf den Nervenachseln (WESTERKAMP & DEMMELMEYER 1997).

Bei diesem Versuch wurden in zeitlich festgelegten Abständen nach dem Austrieb der Blätter Proben einer etwa 6 Jahre alten Rotbuche entnommen und jeweils mit verschiedenen Staubfraktionen bestäubt. 110 Tage nach dem Austrieb der Blätter konnte sicher davon ausgegangen werden, dass die Blätter vollkommen ausdifferenziert waren. Die Blätter hatten einen Großteil der Blattbehaarung verloren und wurden erneut auf ihr Staubfangvermögen hin untersucht.

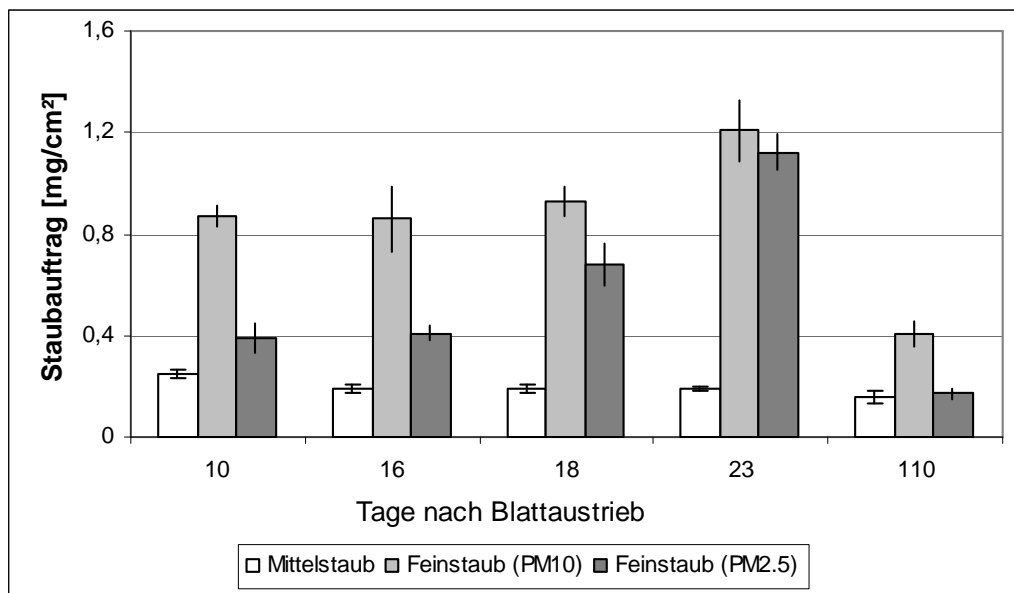


Abb. 37: Staubfangvermögen [mg/cm²] von Blättern der Rotbuche (*Fagus sylvatica*) in Abhängigkeit des Blattalters. Dargestellt sind Mittelwert (n=25) und Standardabweichung.

Am Beispiel der Rotbuche konnte eine leichte Erhöhung der Staubmenge im Feinstaubbereich PM10 und PM2.5 mit zunehmender Ausbildung der Schutzbehaarung festgestellt werden (Abb. 37). Austreibende Blätter weisen oftmals eine dichte Behaarung auf, die die juvenilen Gewebe schützen sollen.

Die Haare steigern die Remission der auftreffenden Strahlen und beugen somit Strahlungsschäden in den sich noch entwickelnden Geweben vor (LARCHER 2001). Nach der vollständigen Maturation der Blätter verlor sich ein Großteil der Haare bei *Fagus sylvatica* (Abb. 38). Im Zuge der jahreszeitlichen Entwicklung kann sich zudem die Anzahl der Trichome durch Abbrechen oder mechanische Zerstörung durch Wettererscheinungen etc. reduzieren (SMITH 1990).

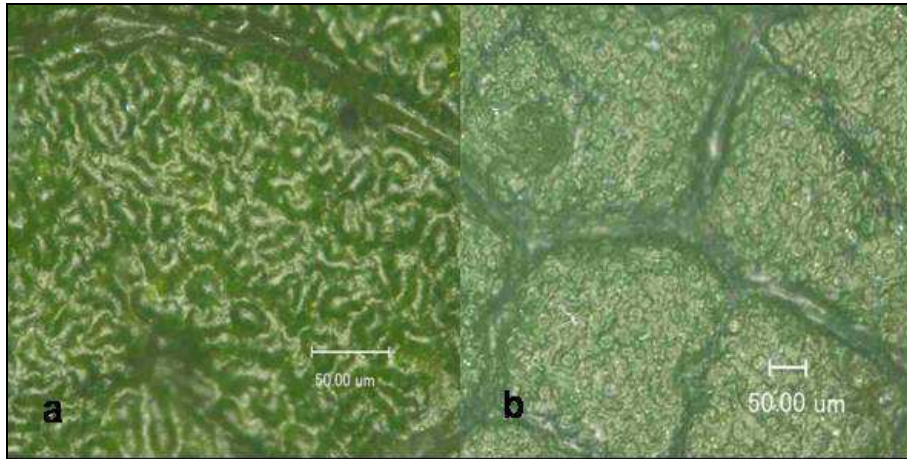


Abb. 38: Ausdifferenziertes Blatt von *Fagus sylvatica* (a) Blattoberseite (b) Blattunterseite

Wie der Abbildung 37 zu entnehmen ist, ging mit dem Verlust der Behaarung bei *Fagus sylvatica* ein signifikanter Rückgang des Staubfangvermögens einher. Es konnte hier eine Reduktion der Staubbindung im Bereich PM10 um 66 % und im Bereich PM2.5 um 85 % im Vergleich zu den undifferenzierten Blattproben von Tag 10 festgestellt werden. Die Reduktion der Mittelstaubfraktion lag bei 16 %.

In der zeitlichen Abfolge zeigte sich, dass sich die feinen Kornfraktionen deutlich besser an die Blattoberflächen und Trichome banden als die gröberen Fraktionen.

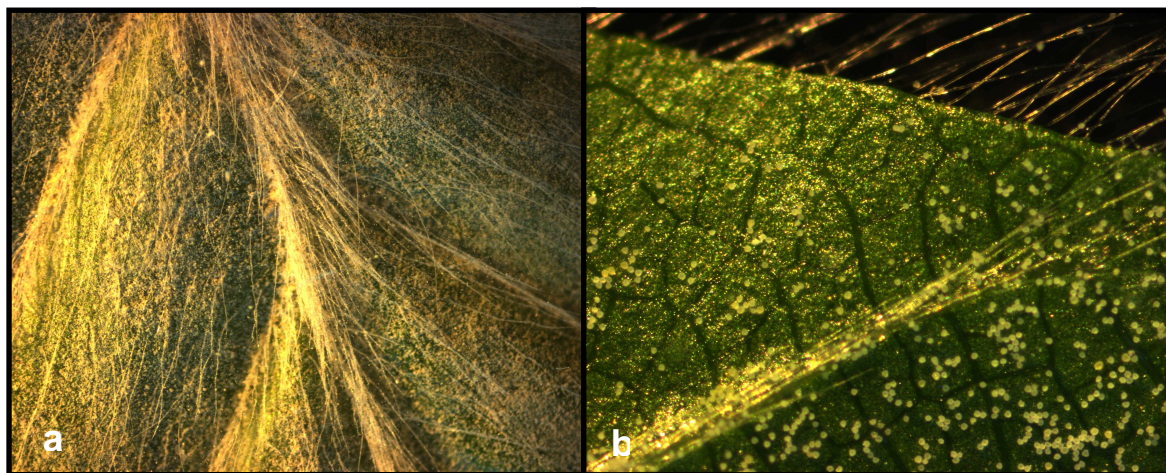


Abb. 39: Blattunterseiten von jungen Blättern von *Fagus sylvatica* (a) bestaubt mit Feinstaub, (b) bestaubt mit Mittelstaub. 25 fache Vergrößerung

Die jungen Blätter von *Fagus sylvatica* zeichneten sich durch sehr lange Einzelhaare (max. 3000 µm Länge) aus (Tab. 13). Diese verteilten sich flächig auf dem gesamten Blatt, wobei sie sich auf den Hauptnerven dichter bündelten (Abb. 39 a). Das ganze Blatt wirkte flaumartig mit Haaren besetzt, besonders an den Rändern waren viele Haare inseriert, die wie ein Kranz die Blattspreite umgaben. Die Mittelstaubpartikel (*Lycopodium*) lagerten sich hauptsächlich an den Hauptnerven an und weniger dicht auf der Blattspreite (Abb. 39 b). Dies lässt vermuten, dass der Mittelstaub in diesem Falle nicht zwingend an eine dichte Behaarung gebunden ist, sodass bei der Rotbuche relativ konstant niedrige Staubfangmengen in der zeitlichen Abfolge gemessen wurden.

Auffallend waren die deutlichen Unterschiede im Bereich des Feinstaubes. Der Anteil an Partikeln PM_{2.5} stieg mit zunehmender Blattbehaarung signifikant an (Abb. 37) und glich schließlich, nachdem die Blätter einen Großteil verloren hatten, quantitativ dem Staubauftrag bei Mittelstaub. Dieses Ergebnis ließ vermuten, dass möglicherweise die besonders langen Haare der Rotbuche geeignete Räume schafften, sodass sich dort die feinsten Partikel ablagern konnten.

Untersuchungen zeigten eine sehr unterschiedliche Aufnahme von Staub im Bezug auf das Alter der Bäume. Junge Eichen in direkter Straßennähe zeigten einen Staubauftrag von 193 mg/m² Fläche, währenddessen eine reife Eiche in der Nähe einer Autobahn 205 mg/m² aufwies (BECKETT 2000a).

Mit zunehmendem Alter von Blättern verändert sich die Oberfläche von Blättern.

So weisen ältere Fichtennadeln eine brüchige Wachsschicht auf, die deren hydrophobe Eigenschaften verändert. DRÖSCHER (1990) zeigte, dass somit wasserlösliche Partikelstoffe besser in das Pflanzeninnere vordringen können. Ebenso steigt die Benetzbarkeit und mikrobielles Wachstum auf der Oberfläche wird begünstigt (KNOLL & SCHREIBER 2000).

3.1.1.1.5 Taxonomische Eingliederung

Um einen eventuellen Zusammenhang zwischen Taxonomie und Staubfiltervermögen zu analysieren, wurden die untersuchten Arten nach ihrer systematischen Einbindung gruppiert. Insgesamt wurden Pflanzen aus 39 verschiedenen Pflanzenfamilien untersucht. Quantitativ am häufigsten war die Familie der *Poaceae* mit 18 Arten vertreten, gefolgt von den *Rosaceae* mit 8 Arten.

6 Arten aus der Familie der *Asteraceae* wurden auf ihr Staubfiltervermögen hin untersucht. Daneben kamen die Arten der Familien *Betulaceae* (4), *Lamiaceae* (4), *Adoxaceae* (3) und *Fagaceae* (3) relativ häufig vor.

Weitere Familien sind der Tab. 16 zu entnehmen.

Innerhalb der taxonomischen Klassifizierung ließ sich kein direkter Zusammenhang zwischen Pflanzenfamilien und Staubfangvermögen feststellen.

Bei den Arten, die ein hohes Staubfangvermögen (größer 1 mg/cm²) aufwiesen, waren einige Süßgräser vertreten. *Lagurus ovatus* mit seinen haarigen Blattspreiten erzielte mit $3,91 \pm 0,53$ mg/cm² die zweithöchsten Werte im Feinstaubfangvermögen (PM10) (Tab. 15), jedoch fanden sich auch besonders niedrige Auflagerungen von Feinstaub (PM10) bei *Briza maxima* von $0,19 \pm 0,04$ mg/cm², sodass ein generell hohes Staubfangvermögen innerhalb der *Poaceae* nicht festzustellen war.

Innerhalb der *Betulaceae* zeigte sich ebenfalls eine große Variabilität in der Quantität des Staubauftrages. Die Blätter von *Corylus colurna* fingen mit $1,86 \pm 0,17$ mg/cm² deutlich mehr Feinstaub (PM10) als beispielsweise *Carpinus betulus* mit $0,27 \pm 0,01$ mg/cm².

Die 6 untersuchten Arten der Familie der *Asteraceae* zeigten allgemein keinen hohen Staubauftrag, so lagen alle unter 1 mg/cm². Auf den Blättern von *Taraxacum officinalis* konnte ein minimaler Auftrag von $0,09 \pm 0,02$ mg/cm² und bei *Hieracium pilosella* ein Auftrag von $0,99 \pm 0,09$ mg/cm² festgestellt werden.

Allein die Familienzugehörigkeit schien keinen Einfluss auf das Staubfangvermögen zu haben.

Tab. 16: Auflistung des maximalen Staubfangvermögens [mg/cm²] von Feinstaub (PM10 und PM2.5) auf Blättern diverser Pflanzenspezies. Dargestellt ist der Mittelwert (n=25) mit Standardabweichung (SD) absteigend nach dem maximalen Staubbindevermögen sortiert mit systematischer Einbindung.

Wissenschaftlicher Name	PM10	SD	PM2.5	SD	Familie
<i>Viburnum rhytidophyllum</i>	9,76	2,57	7,65	2,12	Adoxaceae
<i>Lagurus ovatus</i> *	3,91	0,53	1,5	0,2	Poaceae
<i>Ribes sanguineum</i>	3,57	0,47	3,18	0,62	Grossulariaceae
<i>Sorbus intermedia</i>	2,31	0,41	1,01	0,21	Rosaceae
<i>Phlomis fruticosa</i>	2,13	0,68	1,37	0,38	Lamiaceae
<i>Althaea officinalis</i>	1,93	0,64	1,76	0,43	Malvaceae
<i>Corylus colurna</i>	1,86	0,17	0,67	0,07	Betulaceae
<i>Festuca cinerea</i> *	1,85	0,3	0,29	0,06	Poaceae
<i>Tilia tomentosa</i>	1,6	0,2	1,21	0,13	Tiliaceae
<i>Holcus lanatus</i>	1,49	0,21	1,24	0,35	Poaceae
<i>Buddleja davidii</i>	1,41	0,36	1,12	0,29	Buddlejaceae
<i>Arrhenatherum elatius</i> *	1,37	0,31	0,75	0,18	Poaceae
<i>Hordeum murinum</i> *	1,34	0,14	0,49	0,11	Poaceae
<i>Quercus rubra</i>	1,33	0,18	0,83	0,14	Fagaceae
<i>Salvia officinalis</i>	1,31	0,17	0,72	0,11	Lamiaceae
<i>Weigelia middendorffiana</i>	1,29	0,12	1,12	0,14	Diervillaceae
<i>Potentilla anserina</i>	1,2	0,26	0,12	0,03	Rosaceae
<i>Geranium x magnificum</i>	1,15	0,32	1,1	0,23	Geraniaceae
<i>Corylus avellana</i>	1,12	0,27	0,76	0,15	Betulaceae
<i>Viburnum lantana</i>	1	0,27	0,41	0,13	Adoxaceae
<i>Hieracium pilosella</i>	0,99	0,09	0,11	0,02	Asteraceae
<i>Alchemilla mollis</i>	0,94	0,27	0,72	0,17	Rosaceae
<i>Bromus erectus</i> *	0,7	0,13	0,49	0,15	Poaceae
<i>Rhus typhina</i>	0,61	0,19	0,57	0,11	Anacardiaceae
<i>Ficus benjamini</i>	0,58	0,03	0,33	0,03	Moraceae
<i>Nephrolepis exaltata</i>	0,57	0,06	0,39	0,05	Lomariopsidaceae
<i>Plantago major</i>	0,57	0,06	0,14	0,03	Plantaginaceae
<i>Poa annua</i> *	0,57	0,19	0,34	0,14	Poaceae
<i>Lamium album</i>	0,55	0,09	0,04	0,01	Lamiaceae
<i>Phleum pratense</i> *	0,53	0,19	0,5	0,22	Poaceae
<i>Fallopia japonica</i>	0,52	0,11	0,46	0,07	Polygonaceae
<i>Lavandula angustifolia</i>	0,49	0,11	0,29	0,09	Lamiaceae
<i>Deschampsia cespitosa</i>	0,48	0,07	0,07	0,01	Poaceae
<i>Dracaena marginata</i>	0,48	0,05	0,22	0,04	Rusaceae
<i>Agrostis stolonifera</i> *	0,46	0,15	0,59	0,17	Poaceae
<i>Sorbus aucuparia</i>	0,46	0,05	0,39	0,03	Rosaceae
<i>Dracaena fragans</i>	0,45	0,02	0,16	0,02	Rusaceae
<i>Solidago gigantea</i>	0,43	0,12	0,39	0,12	Asteraceae
<i>Galium aparine</i>	0,42	0,1	0,12	0,04	Rubiaceae
<i>Prunus laurocerasus</i>	0,42	0,06	0,38	0,04	Rosaceae
<i>Fagus sylvatica</i>	0,41	0,05	0,17	0,02	Fagaceae
<i>Pelargonium peltatum</i>	0,41	0,08	0,31	0,07	Geraniaceae
<i>Calathea rufibarba</i>	0,4	0,03	0,23	0,03	Maranthaceae
<i>Petunia x hybrida</i>	0,37	0,09	0,34	0,08	Solanaceae
<i>Rhododendron catawbiense</i>	0,37	0,08	0,3	0,06	Ericaceae
<i>Berberis vulgaris</i>	0,35	0,06	0,04	0,02	Berberidaceae
<i>Hedera helix</i>	0,35	0,04	0,26	0,04	Araliaceae
<i>Lolium multiflorum</i> *	0,35	0,09	0,27	0,08	Poaceae

Fortsetzung Tab. 16

Wissenschaftlicher Name	PM10	SD	PM2.5	SD	Familie
<i>Setaria glauca</i>	0,35	0,12	0,23	0,06	Poaceae
<i>Urtica dioica</i>	0,35	0,03	0,11	0,03	Urticaceae
<i>Artemisia vulgaris</i>	0,33	0,04	0,08	0,02	Asteraceae
<i>Dactylis glomerata</i>	0,33	0,07	0,27	0,08	Poaceae
<i>Filipendula ulmaria</i>	0,33	0,08	0,03	0,02	Rosaceae
<i>Bromus inermis</i> *	0,32	0,06	0,36	0,03	Poaceae
<i>Ajania pacifica</i>	0,3	0,07	0,22	0,03	Asteraceae
<i>Chamaedorea elegans</i>	0,3	0,02	0,25	0,02	Arecaceae
<i>Lolium perenne</i> *	0,3	0,06	0,26	0,09	Poaceae
<i>Humulus lupulus</i>	0,28	0,13	0,27	0,09	Canabaceae
<i>Sambucus nigra</i>	0,28	0,06	0,25	0,07	Adoxaceae
<i>Carpinus betulus</i>	0,27	0,01	0,26	0,04	Betulaceae
<i>Convolvulus arvensis</i>	0,26	0,05	0,17	0,03	Convolvulaceae
<i>Parthenocissus quinquefolia</i>	0,26	0,04	0,03	0,01	Vitaceae
<i>Pyrus pyraeaster</i>	0,26	0,04	0,05	0,01	Rosaceae
<i>Fraxinus excelsior</i>	0,25	0,04	0,22	0,06	Oleaceae
<i>Aesculus hippocastanum</i>	0,24	0,09	0,23	0,06	Sapindaceae
<i>Bryonia dioica</i>	0,22	0,07	0,22	0,06	Cucurbitaceae
<i>Calystegia sepium</i>	0,22	0,05	0,21	0,04	Convolvulaceae
<i>Anthoxanthum odoratum</i>	0,2	0,04	0,2	0,04	Poaceae
<i>Acer pseudoplatanus</i>	0,19	0,07	0,19	0,04	Sapindaceae
<i>Briza maxima</i>	0,19	0,04	0,13	0,03	Poaceae
<i>Quercus robur</i>	0,19	0,07	0,17	0,04	Fagaceae
<i>Tanacetum vulgare</i>	0,18	0,03	0,21	0,04	Asteraceae
<i>Philadelphus coronarius</i>	0,15	0,03	0,12	0,02	Hydrangeaceae
<i>Prunus spinosa</i>	0,15	0,03	0,03	0,01	Rosaceae
<i>Parthenocissus tricuspidata</i>	0,13	0,05	0,12	0,03	Vitaceae
<i>Platanus x hispanica</i>	0,13	0,03	0,1	0,02	Platanaceae
<i>Juglans regia</i>	0,12	0,03	0,11	0,03	Juglandaceae
<i>Euonymus europaeus</i>	0,09	0,02	0,1	0,02	Celastraceae
<i>Taraxacum officinalis</i>	0,09	0,02	0,03	0,01	Asteraceae
<i>Betula pendula</i>	0,08	0,01	0,06	0,01	Betulaceae
<i>Robinia pseudoacacia</i>	0,08	0,02	0,09	0,01	Fabaceae
<i>Clematis vitalba</i>	0,05	0,01	0,05	0,01	Ranunculaceae

(*) Funke 2008

3.1.1.1.6 Pflanzentypen

Es wurden 16 Bäume, 18 Sträucher/ Halbsträucher, 8 Kletterpflanzen/Lianen, 17 krautige Pflanzen und 17 Gräser auf ihr Staubfangvermögen hin untersucht (Tab.17).

Unter den Bäumen zeigten die Arten *Corylus colurna*, *Tilia tomentosa*, *Quercus rubra* und *Sorbus intermedia* ein hohes Staubfangvermögen über 1 mg/cm². Unter den untersuchten Sträuchern/Halbsträuchern fanden sich die höchsten Staubfänger, namentlich *Viburnum rhytidophyllum*, *Phlomis fruticosa*, *Ribes sanguineum*, *Buddleja davidii*, *Salvia officinalis*, *Weigelia middendorffiana* und *Corylus avellana*. Kletterpflanzen/Lianen Arten die untersucht wurden, zeigten ein allgemein niedriges Staubfangvermögen auf, innerhalb dieses Typus erzielte *Hedera helix* die höchsten Werte mit 0,35 ± 0,04 mg/cm² PM10 und 0,26 ± 0,04 mg/cm² PM2.5.

Unter den krautigen Pflanzen wies *Althaea officinalis* mit 1,93 ± 0,64 mg/cm² PM10 und 1,76 ± 0,43 mg/cm² PM2.5 die höchsten Staubaufträge auf, weitere Arten wie *Potentilla anserina*, *Geranium x magnificum*, *Hieracium pilosella* und *Alchemilla mollis* erreichten Staubaufträge um 1 mg/cm² PM10.

Allgemein lässt sich festhalten, dass unter den untersuchten Arten die höchsten Staubaufträge unter den Sträuchern/Halbsträuchern zu finden waren.

Tab. 17: Das maximale, flächenbezogene Feinstaubfangvermögen (PM10 und PM2.5) [mg/cm²] von Blättern diverser Pflanzenspezies. Dargestellt ist der Mittelwert (n=25) mit Standardabweichung (SD) sortiert unterteilt nach Pflanzentyp, alphabetisch nach dem maximalen Feinstaubfangvermögen

Bäume	PM10	SD	PM2.5	SD
<i>Acer pseudoplatanus</i>	0,19	0,07	0,19	0,04
<i>Aesculus hippocastanum</i>	0,24	0,09	0,23	0,06
<i>Betula pendula</i>	0,08	0,01	0,06	0,01
<i>Carpinus betulus</i>	0,27	0,01	0,26	0,04
<i>Corylus colurna</i>	1,86	0,17	0,67	0,07
<i>Fagus sylvatica</i>	0,41	0,05	0,17	0,02
<i>Fraxinus excelsior</i>	0,25	0,04	0,22	0,06
<i>Juglans regia</i>	0,12	0,03	0,11	0,03
<i>Platanus x hispanica</i>	0,13	0,03	0,10	0,02
<i>Pyrus pyraister</i>	0,26	0,04	0,05	0,01
<i>Quercus robur</i>	0,19	0,07	0,17	0,04
<i>Quercus rubra</i>	1,33	0,18	0,83	0,14
<i>Robinia pseudoacacia</i>	0,08	0,02	0,09	0,01
<i>Sorbus aucuparia</i>	0,46	0,05	0,39	0,03
<i>Sorbus intermedia</i>	1,18	0,25	0,51	0,12
<i>Tilia tomentosa</i>	1,6	0,2	1,21	0,13

Fortsetzung Tab. 17

Strauch/Halbstrauch	PM10	SD	PM2.5	SD
<i>Ajania pacifica</i>	0,3	0,07	0,22	0,03
<i>Berberis vulgaris</i>	0,35	0,06	0,04	0,02
<i>Buddleja davidii</i>	1,41	0,36	1,12	0,29
<i>Corylus avellana</i>	1,12	0,27	0,76	0,15
<i>Euonymus europaeus</i>	0,09	0,02	0,10	0,02
<i>Lavandula angustifolia</i>	0,49	0,11	0,29	0,09
<i>Philadelphus coronarius</i>	0,15	0,03	0,12	0,02
<i>Phlomis fruticosa</i>	2,13	0,68	1,37	0,38
<i>Prunus laurocerasus</i>	0,42	0,06	0,38	0,04
<i>Prunus spinosa</i>	0,15	0,03	0,03	0,01
<i>Rhododendron catawbiense</i>	0,37	0,08	0,30	0,06
<i>Rhus typhina</i>	0,61	0,19	0,57	0,11
<i>Ribes sanguineum</i>	1,76	0,26	1,50	0,33
<i>Salvia officinalis</i>	1,31	0,17	0,72	0,11
<i>Sambucus nigra</i>	0,28	0,06	0,25	0,07
<i>Viburnum lantana</i>	1,00	0,27	0,41	0,13
<i>Viburnum rhytidophyllum</i>	9,76	2,57	7,65	2,12
<i>Weigelia middendorffiana</i>	1,29	0,12	1,12	0,14
Kletterpflanzen/Lianen	PM10	SD	PM2.5	SD
<i>Bryonia dioica</i>	0,22	0,07	0,22	0,06
<i>Calystegia sepium</i>	0,22	0,05	0,21	0,04
<i>Clematis vitalba</i>	0,05	0,01	0,05	0,01
<i>Convolvulus arvensis</i>	0,26	0,05	0,17	0,03
<i>Hedera helix</i>	0,35	0,04	0,26	0,04
<i>Humulus lupulus</i>	0,28	0,13	0,27	0,09
<i>Parthenocissus quinquefolia</i>	0,26	0,04	0,03	0,01
<i>Parthenocissus tricuspidata</i>	0,13	0,05	0,12	0,03
krautige Pflanzen	PM10	SD	PM2.5	SD
<i>Alchemilla mollis</i>	0,94	0,27	0,72	0,17
<i>Althaea officinalis</i>	1,93	0,64	1,76	0,43
<i>Artemisia vulgaris</i>	0,33	0,04	0,08	0,02
<i>Fallopia japonica</i>	0,52	0,11	0,46	0,07
<i>Filipendula ulmaria</i>	0,33	0,08	0,03	0,02
<i>Galium aparine</i>	0,42	0,10	0,12	0,04
<i>Geranium x magnificum</i>	1,15	0,32	1,10	0,23
<i>Hieracium pilosella</i>	0,99	0,09	0,11	0,02
<i>Lamium album</i>	0,55	0,09	0,04	0,01
<i>Pelargonium peltatum</i>	0,41	0,08	0,31	0,07
<i>Petunia x hybrida</i>	0,37	0,09	0,34	0,08
<i>Plantago major</i>	0,57	0,06	0,14	0,03
<i>Potentilla anserina</i>	1,20	0,26	0,12	0,03
<i>Solidago gigantea</i>	0,43	0,12	0,39	0,12
<i>Tanacetum vulgare</i>	0,18	0,03	0,21	0,04
<i>Taraxacum officinalis</i>	0,09	0,02	0,03	0,01
<i>Urtica dioica</i>	0,35	0,03	0,11	0,03

Fortsetzung Tab. 17

Gräser	PM10	SD	PM2.5	SD
<i>Agrostis stolonifera</i> *	0,46	0,15	0,59	0,17
<i>Anthoxanthum odoratum</i>	0,2	0,04	0,2	0,04
<i>Arrhenatherum elatius</i> *	1,37	0,31	0,75	0,18
<i>Briza maxima</i>	0,19	0,04	0,13	0,03
<i>Bromus erectus</i>	0,7	0,13	0,49	0,15
<i>Bromus inermis</i>	0,32	0,06	0,36	0,03
<i>Dactylis glomerata</i>	0,33	0,07	0,27	0,08
<i>Deschampsia cespitosa</i>	0,48	0,07	0,07	0,01
<i>Festuca cinerea</i> *	1,85	0,30	0,29	0,06
<i>Holcus lanatus</i>	1,49	0,21	1,24	0,35
<i>Hordeum murinum</i> *	1,34	0,14	0,49	0,11
<i>Lagurus ovatus</i>	3,91	0,53	1,5	0,2
<i>Lolium multiflorum</i> *	0,35	0,09	0,27	0,08
<i>Lolium perenne</i> *	0,30	0,06	0,26	0,09
<i>Phleum pratense</i>	0,53	0,19	0,50	0,22
<i>Poa annua</i> *	0,57	0,19	0,34	0,14
<i>Setaria glauca</i> *	0,35	0,12	0,23	0,06

(*) Funke 2008

Aufgrund der Tatsache, dass die Feinstaubbelastung in Innenräumen oftmals die zulässigen Grenzwerte überschreiten, durch z.B. Kerzenruß (PFANZ et al. 2006), wurden zudem ausgewählte gängige Zimmerpflanzen auf ihr Staubfangvermögen hin untersucht. Als Zimmerpflanzen eignen sich besonders Arten, die an die klimatischen Bedingungen von Innenräumen angepasst sind. Meist werden dabei entweder Pflanzen mit hohem Blühwert und/oder dekorativem Laub bevorzugt. In Innenräumen haben Zimmerpflanzen einen hohen Stellenwert, da sie zum einen das Raumklima verbessern (Sauerstoff, Luftfeuchte) und zum anderen Schadstoffe wie z.B. Formaldehyd, Toluol und Ammoniak aus der Wohnluft filtern können. Untersuchungen der NASA zu diesem Thema belegten, dass beispielsweise durch *Philodendron domesticum* innerhalb von 24 Stunden eine Reduktion von Formaldehyd von 20 auf 3 ppm erzielt wurde (WOLVERTON 1989).

Im Rahmen dieser Arbeit zeigte sich, dass die untersuchten Zimmerpflanzen eine eher geringe Staubfangleistung erzielten, die Werte bewegten sich im Bereich von 0,58 bis 0,3 mg/cm² PM10 und zwischen 0,33 bis 0,25 mg/cm² PM2.5 (Tab. 18).

Mit Ausnahme von *Calathea rufibarba* wiesen alle untersuchten Zimmerpflanzen sehr glatte Oberflächen auf, die nahezu unbehaart waren. Die Korbmaranthe war mit sehr langen Haaren versehen, die jedoch näher betrachtet nicht sehr dicht beieinander lagen. Dies erklärte den eher geringen Staubauftrag, obwohl eine Behaarung

vorhanden war. *Ficus benjamini* und *Nephrolepis exaltata* waren mit 0,58 mg/cm² PM10 die besten Staubfänger unter den untersuchten Zimmerpflanzen.

Trotz des eher geringen bis mittelmäßigen Staubfangvermögens in den Fraktionen PM10 und PM2.5 ist der Beitrag der Zimmerpflanzen zur Verbesserung der Luftqualität in Innenräumen nicht zu unterschätzen. Die Pflanzen unterliegen in der Regel nicht dem jahreszeitlichen Wandel mit Seneszenz und vollkommenem Blattabwurf. Ganzjährig stellen sie somit Senken für Feinstäube dar.

Tab. 18: Das maximale, flächenbezogene Feinstaubfangvermögen (PM10 und PM2.5) [mg/cm²] von Blättern diverser Zimmerpflanzen. Dargestellt ist der Mittelwert (n=25) mit Standardabweichung (SD) alphabetisch nach dem maximalen Feinstaubfangvermögen sortiert

Zimmerpflanzen	PM10	SD	PM2.5	SD
<i>Calathea rufibarba</i>	0,4	0,03	0,23	0,03
<i>Chamaedorea elegans</i>	0,30	0,02	0,25	0,03
<i>Dracaena fragans</i>	0,45	0,02	0,16	0,02
<i>Dracaena marginata</i>	0,48	0,05	0,22	0,04
<i>Ficus benjamini</i>	0,58	0,03	0,33	0,03
<i>Nephrolepis exaltata</i>	0,57	0,06	0,39	0,05

3.1.1.2 *Das maximale, flächenbezogene Staubfangvermögen von Zweigen - differenziert nach Jahrgängen*

Im ersten Teil wurde ausführlich über das Staubfangvermögen von Blättern berichtet. Viele Arten, die in Ballungsräumen angepflanzt werden sind sommergrün und werfen im Herbst ihr Laub ab. Somit steht die ganze Blattmasse mit ihrer großen Oberfläche gerade im Winter mit den häufig hohen Feinstaubbelastungen zur Staubfilterung nicht zur Verfügung. Zweig- und Aststrukturen von Bäumen und Sträuchern stehen ganzjährig für die Staubfilterung zur Verfügung, sodass im Folgenden Quantifizierungen zur Staubauflagerung differenziert nach verschiedenen Jahrgängen an ausgesuchten Arten dargestellt wurden.

3.1.1.2.1 *Diesjährige Zweige*

An ausgesuchten Arten wurden diesjährige Zweige auf ihr maximales Staubfangvermögen hin untersucht. Dabei wurde mittels turbidimetrischer Methode der Feinstaub PM_{2.5} bestimmt. Insgesamt wurden 17 Pflanzenarten, darunter überwiegend Bäume und Sträucher, beprobt.

Es zeigte sich ein sehr heterogenes Staubfangvermögen bei den untersuchten Arten. *Rhus typhina* erzielte mit $5,67 \pm 0,58 \text{ mg/cm}^2 \text{ PM}_{2.5}$ den höchsten Wert, währenddessen bei *Rosa canina*, *Bryonia dioica*, *Fraxinus excelsior*, *Humulus lupulus* und *Acer tataricum* Werte deutlich unter $0,4 \text{ mg/cm}^2 \text{ PM}_{2.5}$ erreicht wurden (Abb.41).

Zu den guten Staubfängern zählten die Arten *Rhus typhina*, *Tilia tomentosa*, *Ribes sanguineum*, *Corylus avellana*, *Carpinus betulus* und *Viburnum rhytidophyllum*, die alle eine Staubauflagerung über $1 \text{ mg/cm}^2 \text{ PM}_{10}$ und $\text{PM}_{2.5}$ aufwiesen.

Bei vielen Pflanzen findet man häufig an jungen Geweben eine dichte Behaarung. Die juvenilen Gewebe sind noch nicht vollständig ausdifferenziert und sind empfindlich gegenüber hohen Strahlungsintensitäten (v.a. im UV Bereich) und Temperaturen, zudem dient eine Behaarung der Abwehr und dem Fraßschutz.

Diese Schutzbehaarung zeigte sich besonders ausgeprägt bei *Viburnum rhytidophyllum* (Abb. 40), dessen junge Triebe stark mit Bündelhaaren versetzt waren als auch bei *Rhus typhina*, dessen diesjährige Triebe eine dichte Behaarung mit Einfachhaaren aufwiesen (Abb.42).

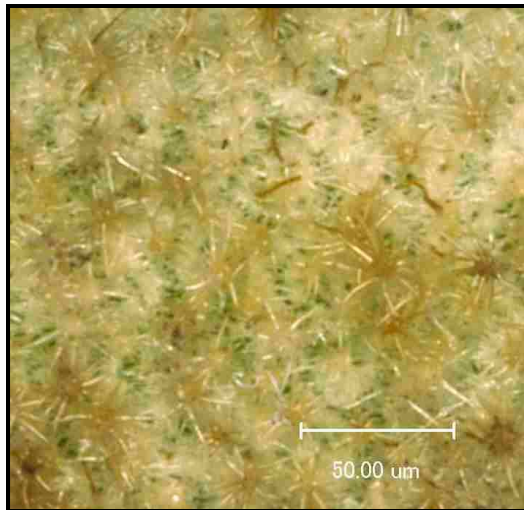


Abb.40: diesjähriger Spross von *Viburnum rhytidophyllum*, dichte Behaarung mit Bündelhaaren

Die starke Behaarung der Triebe fand sich an den Blättern wieder, was auch dort zu den höchsten Staubaufträgen führte (Tab.14).

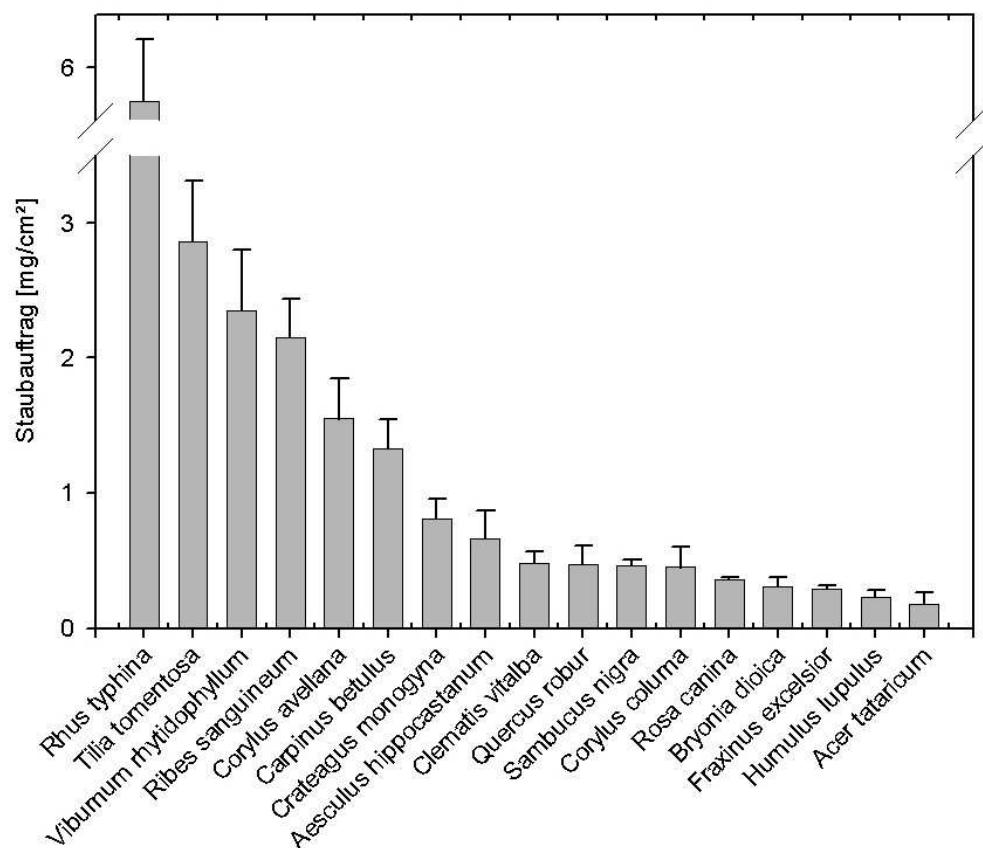


Abb. 41 : Maximales, flächenbezogenes Feinstaubfangvermögen (PM2.5) [mg/cm²] ausgewählter Spezies von diesjährigen Zweigoberflächen. Dargestellt ist der Mittelwert (n=10) mit SD, verändert nach HASENMÜLLER (2008), PAKLEPPA (2008)

Ein direkter Zusammenhang zwischen haarigen und stark strukturierten Zweigoberflächen konnte festgestellt werden. So erzielten alle Arten, die eine dichte Behaarung aufwiesen ein erhöhtes Staubfangvermögen, welches größer als $1 \text{ mg/cm}^2 \text{ PM}_{2.5}$ war. Ein besonders hoher Staubauftrag konnte auf *Rhus typhina* mit $5,68 \pm 0,58 \text{ mg/cm}^2 \text{ PM}_{2.5}$ festgestellt werden (Abb.42).

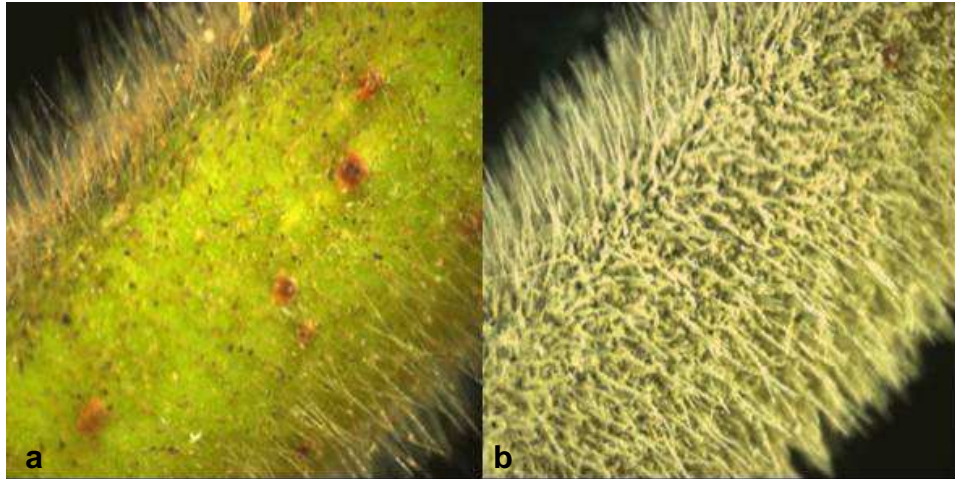


Abb. 42: diesjähriger Trieb von *Rhus typhina* (a) mit sehr dichter Behaarung mit Einfachhaaren, (b) mit Feinstaub bestaubter Trieb, 25-fache Vergrößerung, PAKLEPPA 2008

Abnehmend mit der Behaarung der diesjährigen Zweigoberfläche nahm unter den untersuchten Arten das Staubfangvermögen ab. Unter den besten Staubfängern lagen Einfach-, Bündel- und Schildhaare vor, die sich in ihrer Verteilung und Dichtigkeit unterschieden. Die guten Staubfangwerte gingen mit einer dichten Behaarung einher. Bei den weniger stark behaarten Zweigen z.B. bei *Corylus avellana* kam eine Längsriefigkeit der Oberfläche hinzu, so dass auch hier Staub gut binden konnte.

Die Abschlussgewebe können infolge des sekundären Dickenwachstums einerseits von einem Periderm oder von Borken gebildet werden. Bei einigen Arten wie *Fagus sylvatica* und *Carpinus betulus* bleibt das Phellogen des Korkgewebes über mehrere Jahre aktiv, was zu einer sehr glatten Stammoberfläche führt. Bei der Borke bildet sich das Periderm ständig neu und sie besteht aus der Gesamtheit des abgestorbenen Zellmaterials außerhalb des aktuellen Periderms. Borken sind in ihrer Ausprägung ausgesprochen facettenreich (Abb.43) und können bei älteren Bäumen eine Mächtigkeit von mehreren Zentimetern erreichen (SITTE et al. 1999).

Die große Vielfalt und Oberflächenstruktur der Borke erklärt die große Variabilität innerhalb der untersuchten Arten.

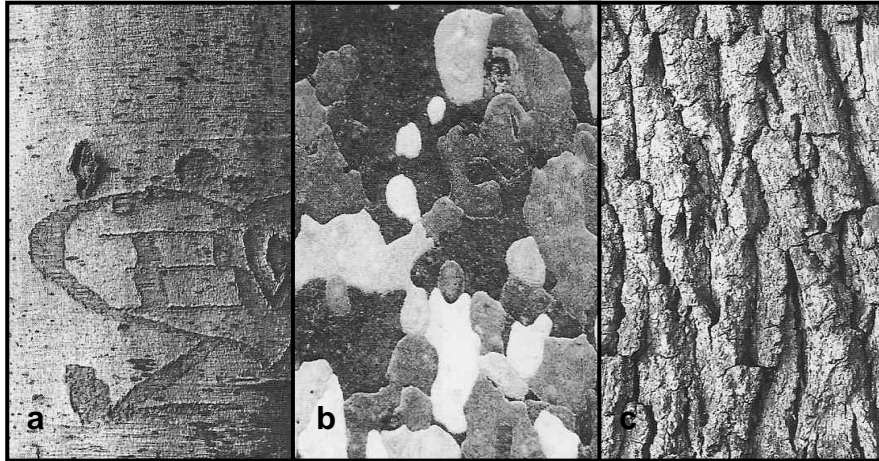


Abb. 43: Abschlussgewebe **(a)** Periderm von *Fagus sylvatica*, **(b)** Schuppenborke bei *Platanus x hispanica*, **(c)** tiefrissige Borke bei *Quercus robur* (SITTE et al. 1999)

An Zweigen von *Pinus strobus* (Weymouthkiefer) blieb mehr Staub haften als an den Nadeln (HEICHEL & HANKIN (1976)). Obwohl die Kiefer eine rund 10fach höhere Blattoberfläche besaß (12 m große Kiefer aus einer dichten Bepflanzung mit 15×10^5 cm² Blattfläche), hielten die holzigen Oberflächen rund 20fach höhere Mengen Staub als die Blätter.

Nach BELOT et al. (1975,1994) beträgt der Anteil der auf den Zweigen von Kiefern und Eichen abgelagerten Partikelkonzentrationen an der Gesamtablagerung höchstens 10 %. Andere Forschungsergebnisse zeigten anhand von Ablagerungsversuchen, dass der Anteil der Stämme und Zweige an der Gesamtablagerung sehr gering und zu vernachlässigen sei (JONAS 1984).

Die Ergebnisse von diesjährigen Zweigen zeigten, dass das Staubfangvermögen stark von der Morphologie der Oberfläche abhängt und dass hohe Staubwerte mit einer großen Rauigkeit, z.B. durch Haare, korrelierten (Abb. 41).

Generell wiesen jene Arten, deren diesjährige Sprossoberflächen besonders glatt waren, ein geringes Staubfangvermögen auf, wie z.B. bei *Bryonia dioica*, *Humulus lupulus* und *Acer tataricum*. Bei *Bryonia dioica* konnten Werte von $0,31 \pm 0,07$ mg/cm² und bei *Humulus lupulus* $0,23 \pm 0,05$ mg/cm² PM_{2.5} festgestellt werden. Beide Sprosse waren weitestgehend unbehaart und wiesen einen nahezu runden Sprossdurchmesser auf (Abb.44).

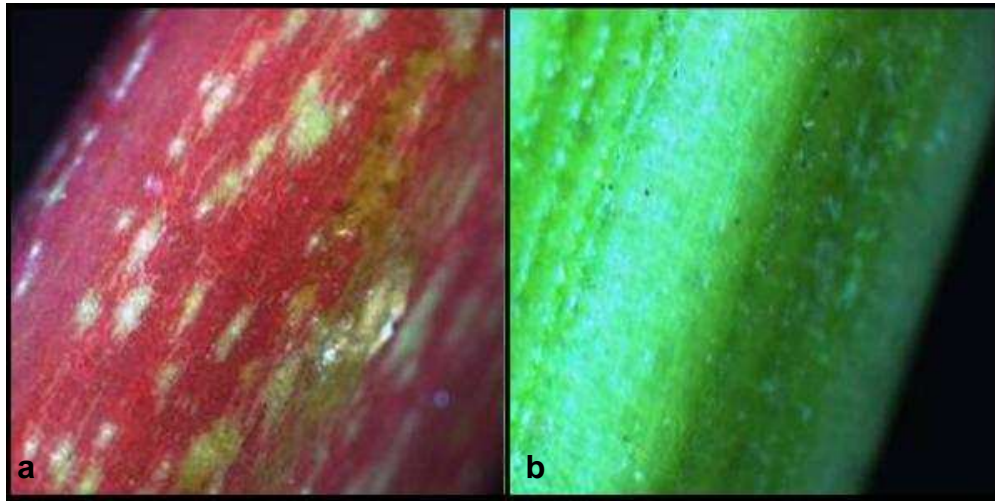


Abb. 44: glatte Oberflächen der Sprosse von **(a)** *Humulus lupulus* **(b)** *Bryonia dioica*; 25fache Vergrößerung PAKLEPPA 2008

Auch bei den Bestäubungen der Zweige zeigte sich, dass eine Behaarung der Oberflächen das Staubfangvermögen positiv beeinflusst. Daneben spielten zudem noch Oberflächenrauigkeiten (u.a. Lentizellen, Längsriefen) eine Rolle, die Einfluss auf die Bindefähigkeit hatten.

3.1.1.2.2 Mehrjährige Zweige

An ausgesuchten Arten wurde an verschiedenen Jahrgängen das maximale, flächenbezogene Staubfangvermögen untersucht.

Dabei zeigte sich bei Arten wie *Viburnum rhytidophyllum* als auch *Quercus robur* ein hohes Staubfangvermögen. Es konnte ein deutlicher linearer Zuwachs von diesjährigen zu älteren Trieben festgestellt werden (Abb.44). Zum einen war diese Steigerung des Staubfangvermögens bei diesen Arten mit einer steigenden Rauigkeit der Sprosse zu erklären, die im Alter durch sekundäres Dickenwachstum eine sehr strukturierte Borke aufwiesen. Zum anderen waren die höher erzielten Werte vom Runzelblättrigen Schneeball durch seine ausgeprägte starke Behaarung zu erklären (Abb.40).

Das Staubfangvermögen für PM_{2.5} lag bei diesjährigen Zweigen bei $1,43 \pm 0,14$ mg/cm² und nahm an fünfjährigen Zweigen zu bis auf $3,95 \pm 0,97$ mg/cm², so dass über das Doppelte an Staub haften blieb.

Gerade die Borke von *Quercus robur* wies eine tiefe Längsriefung auf, die eine extreme Oberflächenvergrößerung zur Folge hatte (Abb. 43c). Je älter die Sprosse der Stieleiche desto strukturierter wurde sie und bot demnach windberuhigte Räume, in denen Feinstaub sedimentieren konnte. Bei *Quercus robur* ließen sich an diesjährigen Zweigen Werte von $0,47 \pm 0,14$ mg/cm² und an fünfjährigen Zweigen $3,56 \pm 0,52$ mg/cm² PM_{2.5} feststellen.

Eine weitere Steigerung des Staubfangvermögens an älteren Eichenborken ist anzunehmen.

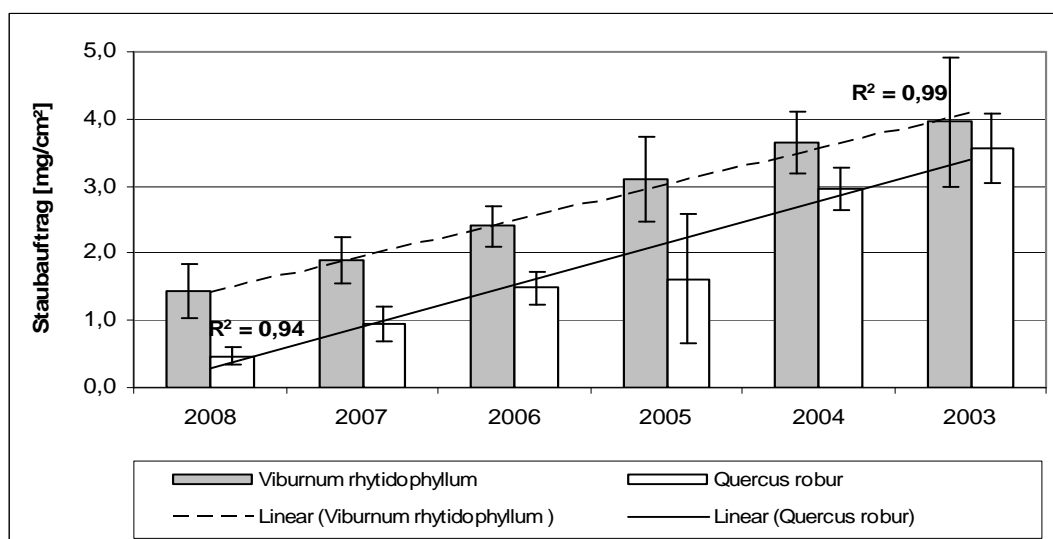


Abb. 45: Maximaler Staubauftrag [mg/cm²] verschiedener Sprossjahrgänge von *Viburnum rhytidophyllum* und *Quercus robur*. Dargestellt ist der Mittelwert (n=10) und SD, verändert nach PAKLEPPA 2008.

Eine deutliche Zunahme des Staubfangvermögens im Bereich PM_{2.5} bei zunehmenden Zweigalter konnte ebenfalls für die Arten *Ribes sanguineum* und *Corylus colurna* gezeigt werden (Tab. 19).

Corylus avellana und *Carpinus betulus* wiesen bezüglich ihres Staubfangvermögens unterschiedliche Ergebnisse auf. Die jungen Triebe beider Arten waren leicht behaart, was eine zunächst gute Staubfilterung bedingte, in den folgenden Jahrgängen verloren sich jedoch die Haare und die Äste verkahlten. Die Borke der Hainbuche bei älteren Zweigen und im Stammbereich wurde glatt, grau und leicht netzartig, eine Borkenbildung fand kaum statt (HECKER 2008). Die Verkahlung in Kombination mit einem sehr glatten Abschlussgewebe korrelierte mit einem sinkenden Staubfangvermögen für PM_{2.5} (Abb. 45).

Tab. 19: Maximales, flächenbezogenes Staubfangvermögen [mg/cm²] von Zweigen verschiedenen Jahrgängen ausgesuchter Spezies, verändert nach HASENMÜLLER 2008, PAKLEPPA 2008

2008	PM2.5	SD	2007	PM2.5	SD
<i>Carpinus betulus</i>	1,33	0,22	<i>Carpinus betulus</i>	0,50	0,16
<i>Corylus avellana</i>	1,55	0,30	<i>Corylus avellana</i>	0,68	0,19
<i>Corylus colurna</i>	0,45	0,15	<i>Corylus colurna</i>	0,53	0,14
<i>Quercus robur</i>	0,47	0,14	<i>Quercus robur</i>	0,95	0,26
<i>Rhus typhina</i>	5,68	0,58	<i>Rhus typhina</i>	3,77	0,73
<i>Ribes sanguineum</i>	2,15	0,29	<i>Ribes sanguineum</i>	2,32	0,61
<i>Tilia tomentosa</i>	2,86	0,45	<i>Tilia tomentosa</i>	2,82	0,34
<i>Viburnum rhytidophyllum</i>	1,43	0,40	<i>Viburnum rhytidophyllum</i>	1,90	0,35
2006	PM2.5	SD	2005	PM2.5	SD
<i>Carpinus betulus</i>	0,36	0,10	<i>Carpinus betulus</i>	0,38	0,13
<i>Corylus avellana</i>	0,92	0,26	<i>Corylus avellana</i>	1,23	0,33
<i>Corylus colurna</i>	0,73	0,10	<i>Corylus colurna</i>	1,17	0,46
<i>Quercus robur</i>	1,48	0,24	<i>Quercus robur</i>	1,62	0,96
<i>Rhus typhina</i>	6,34	0,55	<i>Rhus typhina</i>		
<i>Ribes sanguineum</i>	10,73	1,57	<i>Ribes sanguineum</i>	10,44	1,88
<i>Tilia tomentosa</i>	2,09	0,65	<i>Tilia tomentosa</i>	1,41	0,72
<i>Viburnum rhytidophyllum</i>	2,40	0,31	<i>Viburnum rhytidophyllum</i>	3,11	0,63
2004	PM2.5	SD	2003	PM2.5	SD
<i>Carpinus betulus</i>	0,56	0,11	<i>Carpinus betulus</i>	0,85	0,07
<i>Corylus avellana</i>	1,51	0,22	<i>Corylus avellana</i>	2,63	0,54
<i>Corylus colurna</i>	1,90	0,65	<i>Corylus colurna</i>		
<i>Quercus robur</i>	2,97	0,31	<i>Quercus robur</i>	3,56	0,52
<i>Rhus typhina</i>			<i>Rhus typhina</i>		
<i>Ribes sanguineum</i>			<i>Ribes sanguineum</i>		
<i>Tilia tomentosa</i>	2,13	0,47	<i>Tilia tomentosa</i>	1,85	0,45
<i>Viburnum rhytidophyllum</i>	3,65	0,47	<i>Viburnum rhytidophyllum</i>	3,95	0,97

Am Beispiel von *Corylus avellana* zeigte sich zunächst ein gutes Fangvermögen von $1,55 \pm 0,3 \text{ mg/cm}^2$, welches bei Verkahlung der älteren Zweige jedoch abnahm. An älteren Jahrgängen nahm die Strukturierung der Zweige durch Riefen und Rillen, aber auch Lenticellen zu, was wiederum zu einer deutlichen Steigerung des Staubbefangvermögens führte. So konnten an 6-jährigen Zweigen Staubmengen von $2,63 \pm 0,54 \text{ mg/cm}^2$ gemessen werden (Abb. 45). Der gleiche Trend ließ sich zudem an *Carpinus betulus* feststellen, insgesamt waren die gemessenen Staubbefangwerte jedoch niedriger als bei *Corylus avellana*. Die Oberflächen der Zweige von *Carpinus betulus* waren nur mit wenigen Einfachhaaren versehen, insgesamt waren die Zweige sehr glatt und unstrukturiert. Dennoch wurden die Zweige mit zunehmendem Alter rauer und das Periderm strukturiertes, so dass an 5-jährigen Zweigen wieder eine Steigerung des Feinstaubbefangvermögens gemessen wurde (Abb. 46).

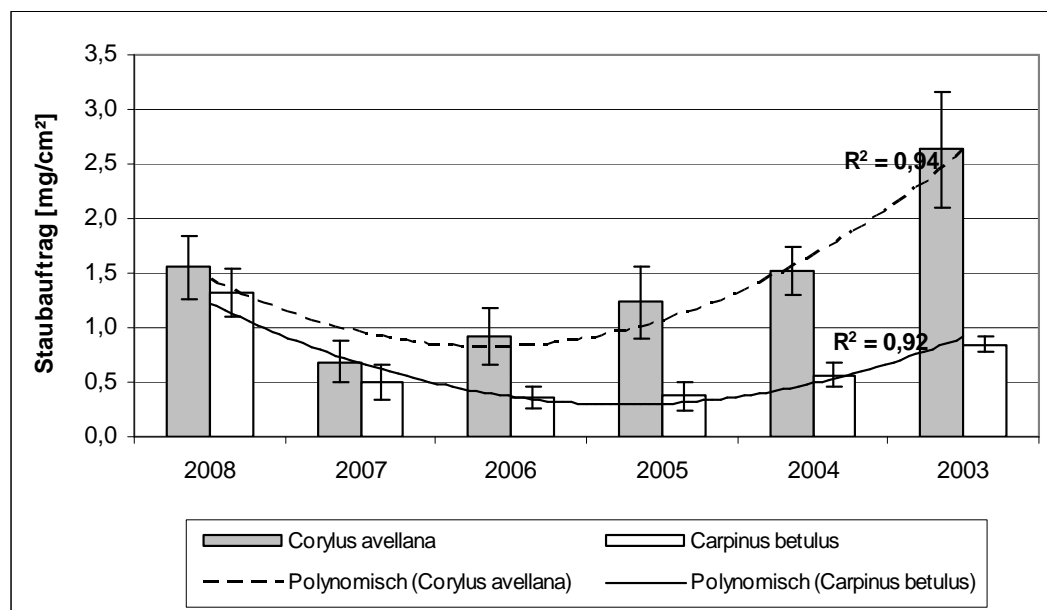


Abb. 46: Maximaler Staubauftrag [mg/cm²] verschiedener Sprossjahrgänge von *Corylus avellana* und *Carpinus betulus*. Dargestellt ist der Mittelwert (n=10) und SD, verändert nach PAKLEPPA 2008

Je rauer und strukturiertes eine Zweigoberfläche war und oder auch im Zuge des sekundären Dickenwachstums wurde, desto mehr Staub konnte gebunden werden. Dabei schien zunächst die Behaarung dominierend für das Bindevermögen sein und rückte später bei älteren Zweigen in den Hintergrund.

Je nach der Ausprägung der Strukturierung der Zweige wurde sogar mehr Staub von Zweigstrukturen gebunden, als von Blättern. Beispielhaft ist in Abbildung 47 das Staubbefangvermögen von Blättern im Vergleich zu diesjährigen Zweigen abgebildet.

Neben *Ribes sanguineum* zeigten sich höchst signifikant erhöhte Feinstaubwerte auf Blättern von *Viburnum rhytidophyllum* als auf Zweigen. Die extrem mit Bündelhaaren besetzten Blätter als auch Zweige hielten den Staub von allen untersuchten Arten am besten. Dennoch waren Blätter, vermutlich aufgrund ihrer großen Fläche effektivere Fänger im Falle des Runzelblättrigen Schneeballs.

Die Arten, welche weiterstgehend unbehaart an den Blättern waren, wie beispielsweise *Sambucus nigra* und *Aesculus hippocastanum*, zeigten eine höchst signifikant erhöhte Staubfangleistung an den Zweigstrukturen (Abb. 47). An diesen waren die Oberflächen durch Lenticellen und Risse deutlich strukturierter und banden so effektiver den Feinstaub (PM2.5) als die Blätter dieser Arten.

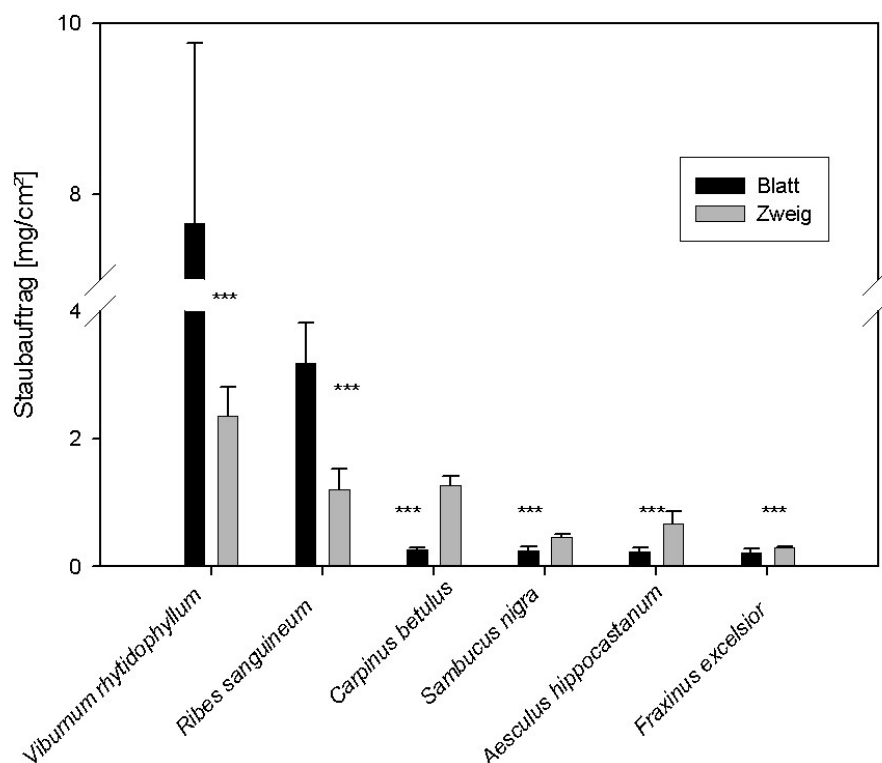


Abb. 47: Maximales, flächenbezogenes Feinstaubfangvermögen PM2.5 [mg/cm²] von verschiedenen Pflanzen differenziert nach Blatt und Zweig (diesjährig)

Die Ergebnisse zeigten, dass Zweig- und Aststrukturen auch im Winter sehr effektiv als Staubfänger gerade für die lungengängigen Feinstäube fungieren können, wenn das Blattwerk bei sommergrünen Arten nicht zur Verfügung steht. Um optimale Bedingungen zur Staubfilterung zu schaffen, sind solche Arten zu präferieren, die bereits für die Blattflächen eine gute Filterleistung erzielen.

3.2. Wirkung von Staubauflagerungen auf Blättern auf den Lichtgenuss - differenziert nach Mittel- und Feinstaub

3.2.1 Transmission

Das Sonnenlicht, welches an einem klaren Sonnentag auf die Erde trifft setzt sich aus ca. 45 % sichtbaren Licht, aus ca. 45 % infrarotem Licht und zu etwa 10 % aus Ultravioletter Strahlung zusammen (SCHUBERT 1991).

Strahlung, die auf photosynthetisch aktives Gewebe trifft, wird absorbiert, remittiert (reflektiert) und transmittiert (SCHULZE 1970).

In der Regel absorbieren Blätter 60-80 % der photosynthetisch aktiven Strahlung (PhAR), die sich im Wellenlängenbereich von 380-720 nm befindet (LARCHER 2001).

Verantwortlich hierfür sind die Pigmente in den Chloroplasten, die Chlorophylle als auch die Carotinoide, die ihre Absorptionsmaxima im roten und blauen Bereich des Spektrums aufweisen. Im spektralen Bereich um 500 nm sinkt die Absorption deutlich aufgrund der bekannten Grünlücke. Diese Wellenlängen werden verstärkt reflektiert als auch transmittiert, wodurch uns augenscheinlich Vegetation und Pflanzen grün erscheinen. UV-Strahlung, also der Wellenlängenbereich kleiner 380 nm, wird durch die Kutikula sowie Einlagerungen phenolischer Verbindungen im Zellsaft abgefangen.

Infrarote Strahlung (>720 nm) wird besonders über 7000 nm nahezu vollständig von Pflanzen absorbiert (LARCHER 2001). Exemplarisch ist in Abbildung 48 die Strahlungsaufnahme eines Blattes der Karolina-Pappel (*Populus deltoides*) dargestellt.

Im Bereich der Globalstrahlung, zwischen 300-3000 nm, werden ca. 55-65 % der auftretenden Strahlung absorbiert.

Eine dichte Behaarung mit toten (weißen) Haaren dient ebenso dem Schutz vor Lichtschäden, da sich in den luftgefüllten Haaren die Reflexion erhöht. Im sichtbaren Bereich nimmt die Absorption der Strahlung infolge höherer Reflexion ab (VON WILLERT 1995).

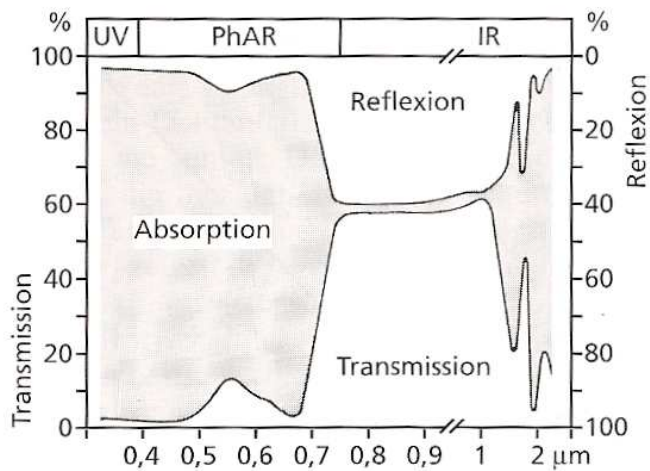


Abb. 48: Spektrale Eigenschaften eines Pappelblattes (*Populus deltoides*) in Abhängigkeit von der Wellenlänge der auftreffenden Strahlung (GATES et al. 1965)

Die Reflexion der Strahlung steigt im grünen Bereich des sichtbaren Licht deutlich an (etwa 10 % werden reflektiert), ebenso im Bereich des infraroten Lichts, wo bis zu 40 % reflektiert werden (Abb. 48).

Insgesamt wurden im Mittel 6-10 % der Strahlung im sichtbaren Bereich remittiert.

Diese Ergebnisse konnten im Rahmen dieser Arbeit bestätigt werden, so konnten hohe Durchlässigkeiten im Bereich des Grünlichts und im nahen Infrarot gezeigt werden (Abb. 49).

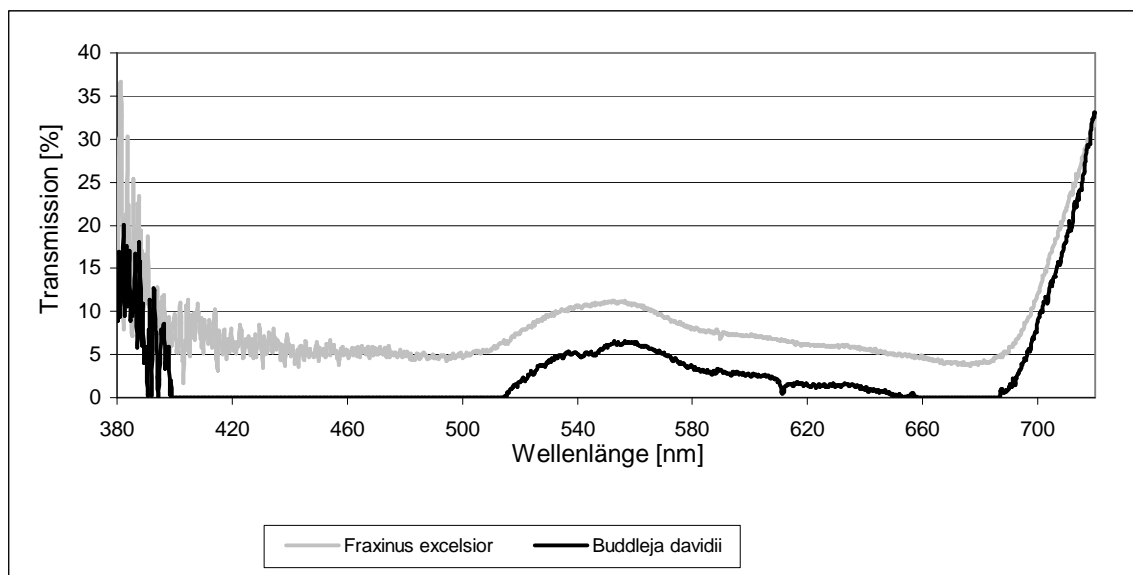


Abb.49: Transmissionsspektren (380-720 nm) von Blättern verschiedener Pflanzen

Transmissionsspektren von Blättern sind von verschiedenen Parametern abhängig. Die Blattmorphologie, Bau und Dicke des Blattes entscheiden unter anderem wie viel Licht transmittiert wird. Blätter, die sehr dünn sind, eine glatte Oberfläche besitzen

oder auch unbehaart sind (*Abb. 49, Fraxinus excelsior*), sind deutlich durchlässiger für Strahlung des gesamten sichtbaren Bereichs als z.B. Blätter des Schmetterlingsflieders (*Abb. 49, Buddleja davidii*), die sich allgemein durch eine größere Blattmächtigkeit als auch einer ausgeprägten Blattbehaarung auszeichnen. Ein mächtiges Palisaden- und Schwammparenchym sorgen für eine sehr effiziente Absorption der Lichtquanten, sodass wenig Licht transmittiert wird.

Mit Hilfe des Spektroradiometers war es möglich, den Einfluss einer Staubauflagerung auf die Lichtverhältnisse im Blatt und der damit verbundenen Reduktion der Transmission zu bestimmen. Für die weiterführende Fragestellung, inwieweit die Lichtreaktion der Photosynthese durch Bestäubung der Blattoberfläche beeinträchtigt wird, lag der Fokus für alle weiteren Messungen im Bereich des sichtbaren, d.h. photosynthetisch aktiven Bereichs.

3.2.1.1 *Transmissionsmessungen von Stäuben unterschiedlicher Mächtigkeit*

Um eine allgemeine Aussage über die Einflüsse von Staubaufträgen auf den Lichtgenuss von Blättern zu erhalten, wurden auf einer Glasfläche (nahezu 100 % Transmission) innerhalb einer festgelegten Fläche definierte Mengen Staub mit steigender Mächtigkeit aufgetragen und die dadurch bedingte Veränderung der Lichttransmission ermittelt.

Im Rahmen dieser Untersuchung zeigten Feinstaub als auch Mittelstaub sehr ähnliche Einflüsse auf die Transmission. Es wurde bei beiden eingesetzten Stäuben eine Abnahme der Lichttransmission mit steigendem Staubauftrag festgestellt, wobei die Transmission bei einem Staubauftrag von 5 mg/cm² (Mittelstaub) bzw. 7 mg/cm² (Feinstaub) auf nur noch 20 % der Ausgangslichtintensität absank (*Abb. 50*).

Bei weiter zunehmendem Staubauftrag reduzierte sich die Transmission nur noch wenig, bis bei einem Staubauftrag zwischen 50 und 80 mg/cm² kaum noch Unterschiede feststellbar waren. Bei maximalem Staubauftrag um die 80 mg/cm² konnte bei Mittelstaub- als auch Feinstaubauflagerung noch eine Transmission von 1 % festgestellt werden.

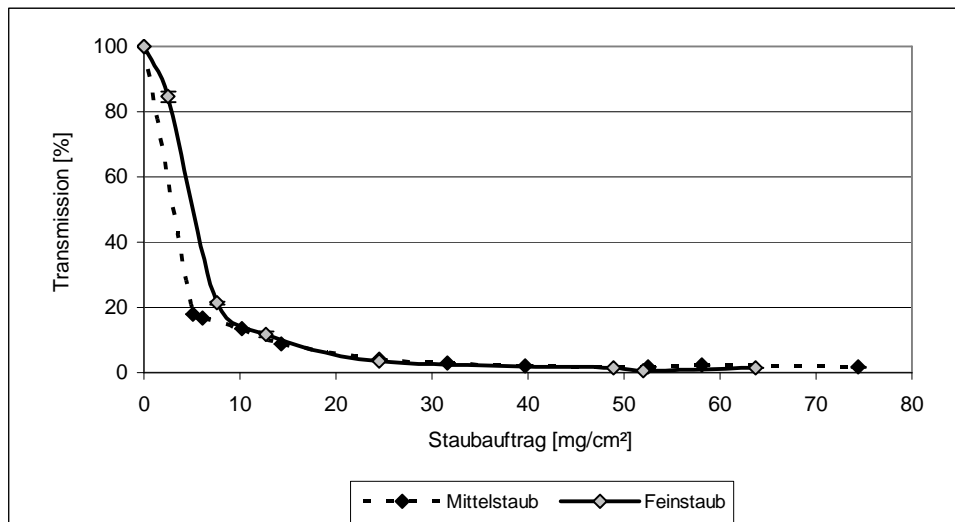


Abb.50: Transmissionsänderung durch Auflagerung von Mittelstaub (*Lycopodium*) und Feinstaub (Fimonit). Dargestellt sind Mittelwerte ($n=10$) und SD

Durch einen Staubauftrag von Mittelstaub von 1 mg/cm^2 reduzierte sich die Transmission um etwa 16 %, die adäquate Menge Feinstaub (Fimonit) erzeugte eine Reduzierung der Transmission um 5 % (Abb. 50). Die ermittelten maximalen Staubfangwerte für Blattflächen lagen größtenteils (85 % der untersuchten Arten) unter 1 mg/cm^2 PM 10 und PM2.5, so dass man davon ausgehen konnte, dass der Einfluss des Staubauftrages der hier eingesetzten Mittel- und Feinstäube auf die Transmission eher gering war.

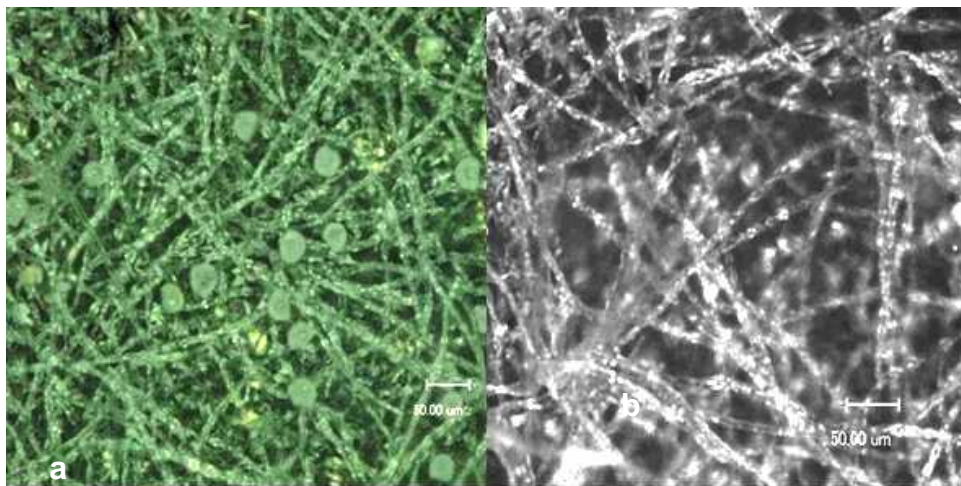


Abb.51: Blattunterseiten von *Buddleja davidii* (a) bestäubt mit Mittelstaub (*Lycopodium*) (b) unbestäubt

Die gemessene Transmission war unter anderem davon abhängig, welche optischen Eigenschaften die jeweilige Staubauflage besitzt. Die Farbe der Auflagerung bestimmt zudem inwieweit eine Erwärmung der Oberfläche stattfindet. Schwarze Rußpartikel, die in Straßenstaub oft enthalten sind, erhitzen die Blattoberfläche stark,

sodass negative Auswirkungen auf die Photosynthese zu erwarten sind. Lichtundurchlässige Partikel reduzieren die Transmission und haben so einen Einfluss auf die Lichtreaktion der Photosynthese (JUNIPER & JEFFREE 1983).

Es war zu vermuten, dass die Sporen des Keulenbärlapps aufgrund ihrer hellgelben Farbe eine höhere Reflexion zeigten. Dies könnte ein Grund für die marginalen Unterschiede in den Transmissionsspektren von *Lycopodium* und Fimonit im Bereich von 0-10 mg/cm² gewesen sein. Wie aus *Abbildung 51 (a)* ersichtlich, waren die kugeligen Sporen von *Lycopodium* relativ homogen verteilt, jedoch bildeten sie keine dichte, plane Fläche aus. Vielmehr konnte Licht an Zwischenräumen hindurch gelangen und zudem über Streuung an den gelben Kugeln ins Mesophyll gelangen.

3.2.1.2 *Änderungen der Lichttransmission von Blättern nach maximal anhaftendem Mittel- und Feinstaubauftrag*

Nachdem zunächst der Einfluss von unterschiedlichen Staubmächtigkeiten auf die Transmission auf einer Glasplatte überprüft wurde, wurde im Anschluss der Einfluss von maximalem Mittel- und Feinstaubauftrag auf verschiedenen Blättern auf die Transmission bestimmt. Hierbei sollte festgestellt werden, inwieweit ein Staubauftrag die optischen Eigenschaften eines Blattes ändert. Unter natürlichen Bedingungen können Blattober- als auch Blattunterseiten einen Staubauftrag erfahren. Letztere werden v.a. durch Windböen und turbulente Fahrtwinde, die z.B. bei Straßenbegleitgrün durch vorbeifahrende Kraftfahrzeuge entstehen, mit Staub impaktiert. Wie viel Strahlung letztlich durch ein Blatt transmittiert wurde hing stark von dessen Morphologie ab (*Tab.13*). So erhöhte eine starke Behaarung der Blattoberflächen die diffuse Reflexion enorm, ebenso wie eine durch kutikuläre Wachse spiegelnde Oberfläche. Besonders helle Stäube, worunter die beiden eingesetzten Stäube Fimonit und *Lycopodium* gehören, bedingten eine höhere Reflexion. Die somit herabgesetzte Absorption verhinderte eine Überhitzung des Blattes.

Es ließ sich ein klarer Zusammenhang zwischen starker Behaarung und sinkender Transmission in *Abbildung 52* erkennen. Bei sehr glatten, sehr spärlich behaarten Blattoberflächen wie z.B. bei der Esche (*Fraxinus excelsior*) als auch bei dem Japanischen Staudenknöterich (*Fallopia japonica*) gelangten zwischen 6,5 und 9 % der ankommenden Strahlung durch das Blatt.

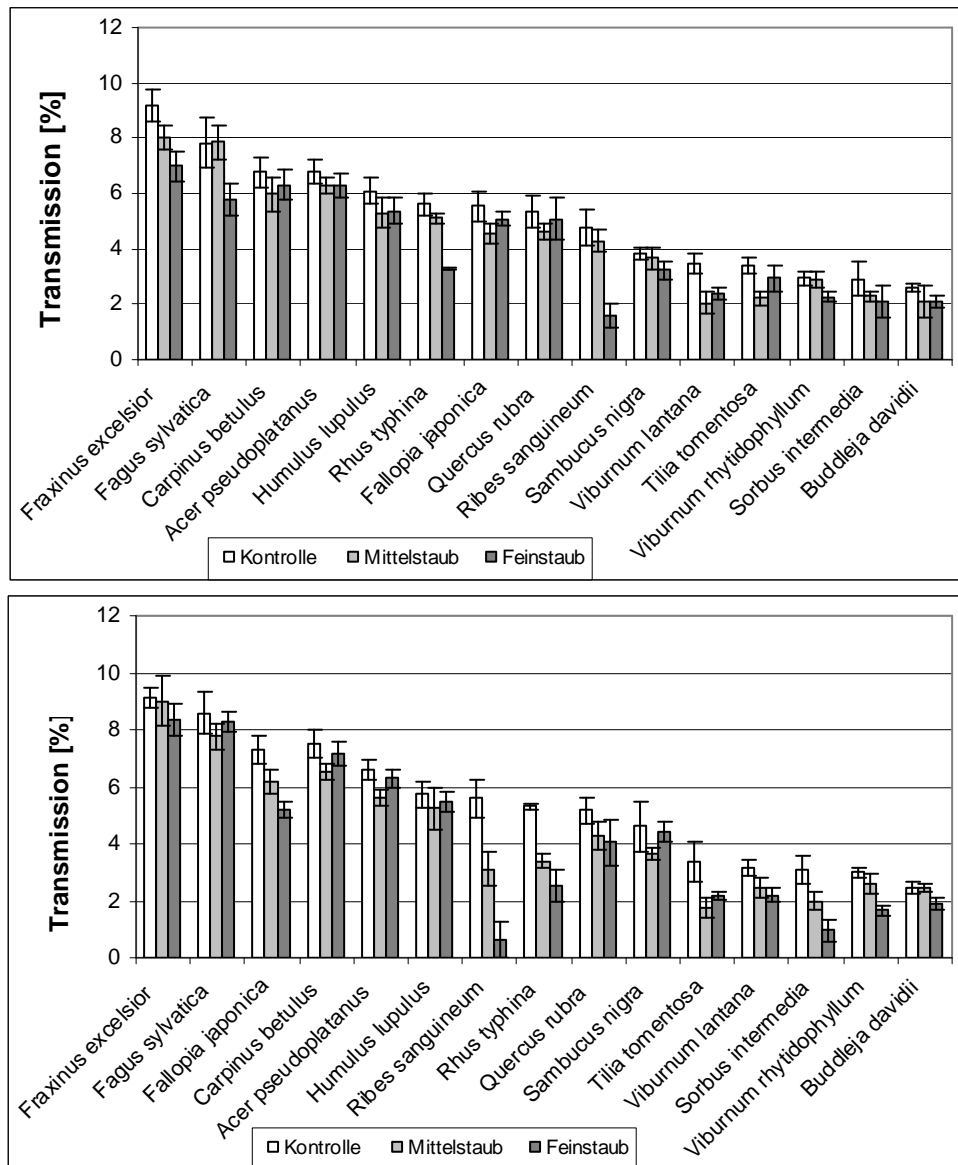


Abb.52: Transmission [%] (Wellenlängenbereich 380-720nm) von Blättern verschiedener Spezies **(a)** bei Exposition der Blattoberseiten zur Lichtquelle (950-1000 $\mu\text{mol Photonen/m}^2\text{s}$) und Bestäubung mit unterschiedlichen Staubfraktionen (Mittelstaub und Feinstaub), **(b)** bei Exposition der Blattunterseiten zur Lichtquelle und Bestäubung mit unterschiedlichen Staubfraktionen (Mittelstaub und Feinstaub). Dargestellt sind die Mittelwerte ($n=10$) und SD.

Dicht behaarte Oberflächen wie sie u.a. beim Runzelblättrigen Schneeball (*Viburnum rhytidophyllum*) als auch beim Schmetterlingsflieder (*Buddleja davidii*) zu finden waren minderten die Transmission durch das Blatt, da sie zum einen die Reflektion erhöhten und zum anderen mehr Staub hielten (Abb.52). Folglich wurde bei diesen Arten deutlich weniger Strahlung von den Blättern transmittiert.

Es konnte eine allgemeine Reduktion der Transmission durch Staubauflagerung festgestellt werden. Dabei zeigte sich, dass beide eingesetzten Stäube signifikante Unterschiede durch verstärkte Absorption und Reflexion bei den untersuchten Arten verursachten (Abb. 52).

Beim überwiegenden Teil der untersuchten Pflanzen zeigte sich eine deutlichere Reduzierung der Transmission durch Feinstaub (z.B. *Ribes sanguineum*) als durch größere Partikel. Bei einigen Arten konnten sehr heterogene Ergebnisse bezüglich der Korngrößen des Staubes beobachtet werden. So zeigte sich z.B. bei der Hainbuche eine größere Reduktion der Transmission durch Mittelstaubauflagerung als durch Feinstaub. Insgesamt wurde die Transmission im Vergleich zur Kontrolle um bis zu 45 % bei Mittelstaubauflagerung und bis zu 90 % bei Feinstaubauflagerung reduziert (Tab.20). Dies hängt mit dem unterschiedlichen Ablagerungsverhalten der beiden Stäube zusammen. Die Feinstäube waren sehr eben und flächig auf den Blattseiten verteilt und minderten so den Lichtgenuss allgemein stärker, wie die als Mittelstaub eingesetzten kugeligen Sporen von *Lycopodium*. Die bestaubten Blattunterseiten verringerten das transmittierte Licht dabei allgemein stärker als die Blattoberseiten. Bei der angewendeten Methode wurden die verschiedenen Blattseiten maximal mit Staub bedeckt. Die bestaubten Seiten wurden bei den Messungen stets von oben mit Licht bestrahlt, die Messfiber war unterhalb des Blattes fixiert.

Tab. 20: Reduktion der Blatttransmission [%] verschiedener Spezies bei maximaler Auflagerung von Mittel- bzw. Feinstaub im Vergleich zur Kontrolle und der Exposition des Blattes zur Lichtquelle. Die Unterschiede der Reduktion der Blatttransmission zwischen unbestaubter Kontrolle und den jeweiligen Stäuben versetzten Blättern sind höchst signifikant (***), hoch signifikant (**), signifikant (*) und nicht signifikant (ns)

	Blattoberseite				Blattunterseite			
	Mittelstaub		Feinstaub		Mittelstaub		Feinstaub	
<i>Acer pseudoplatanus</i>	1,07	ns	4,87	***	13,72	***	3,21	ns
<i>Buddleja davidii</i>	15,88	ns	23,55	***	0	ns	23,08	***
<i>Carpinus betulus</i>	11,72	ns	6,72	***	12,8	*	4,69	ns
<i>Fagus sylvatica</i>	0,13	*	26,5	***	9,56	***	3,61	***
<i>Fallopia japonica</i>	18,04	***	8,46	*	29,01	***	15,53	ns
<i>Fraxinus excelsior</i>	12,55	***	23,89	***	1,32	ns	8,73	***
<i>Humulus lupulus</i>	5,95	**	11,91	**	2,58	ns	3,55	ns
<i>Quercus rubra</i>	4,92	**	13,26	*	17,58	***	21,55	***
<i>Rhus typhina</i>	8,73	**	41,53	***	35,97	***	52,54	***
<i>Ribes sanguineum</i>	10,57	***	60,63	***	44,5	***	89,18	***
<i>Sambucus nigra</i>	4,72	***	17,02	*	21,08	***	4,16	ns
<i>Sorbus intermedia</i>	15,42	***	22,86	*	35,55	***	64,4	***
<i>Tilia tomentosa</i>	34,33	*	13,49	***	43,51	***	35,79	***
<i>Viburnum lantana</i>	40,97	***	30,68	***	23,03	***	30,28	***
<i>Viburnum rhytidophyllum</i>	26,25	***	26,13	***	24,2	*	44,99	***

Tendenziell zeigte sich eine stärkere Transmissionsreduktion an behaarten und strukturierten Blättern (z.B. *Viburnum rhytidophyllum*), währenddessen bei glatten unbehaarten Blättern wie z.B. bei *Fallopia japonica* die Reduktion sehr gering und statistisch nicht haltbar war.

Die größte Reduktion der Transmission durch Staubauftrag konnte bei der Zierjohannisbeere (*Ribes sanguineum*) festgestellt werden. Die besonders starke Reduktion bei dieser Spezies lässt sich mit der Morphologie des Blattes erklären (Abb. 53). Die Blätter zeigten eine stark filzige Behaarung. Haare waren auf beiden Blattseiten vertreten, dabei fanden sich deutlich mehr Haare auf der Blattunterseite. Zudem fanden sich vereinzelt Drüsenhaare (Abb. 26), die sicherlich mitverantwortlich für das hohe Staubfangvermögen waren und die damit einhergehende stärkste Reduktion der Transmission unter allen untersuchten Arten bedingten.

Allgemein lässt sich festhalten, dass auf den Blattunterseiten der verschiedenen Spezies deutlich mehr Staub haften blieb und somit eine stärkere Reduktion der Transmission festzustellen war als auf der Blattoberseite. Bei *Ribes sanguineum* wurde die Transmission um nahezu 90 % bei Bestäubung mit PM10 auf der Blattunterseite reduziert, während die Blattoberseite bei Bestäubung mit PM10 eine Reduzierung von 60 % erfuhr (Tab. 20).

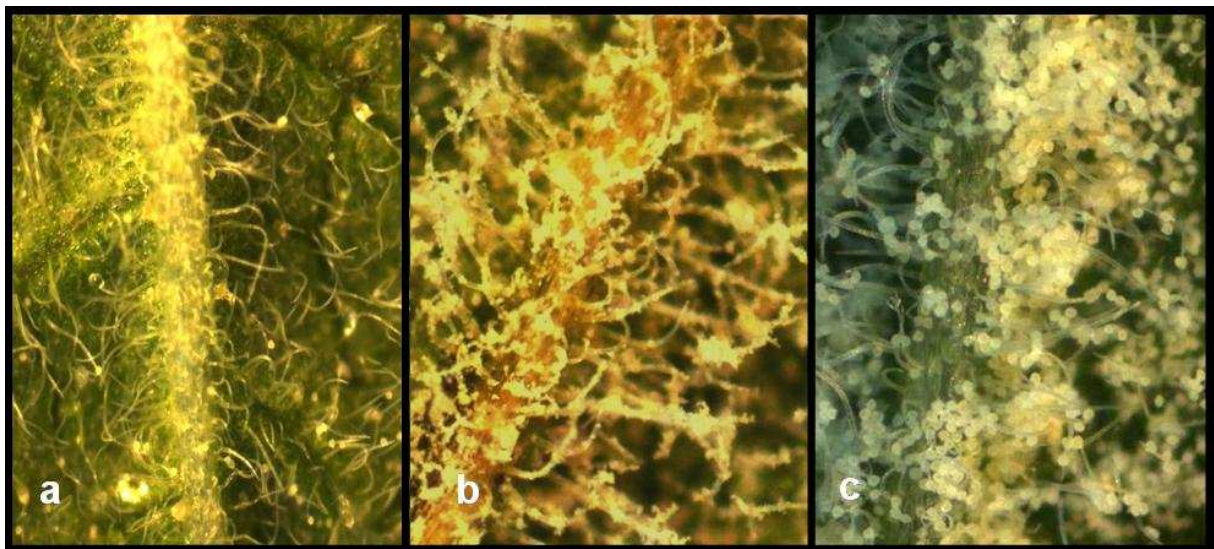


Abb. 53: Einfachhaare auf der Blattunterseite der Zierjohannisbeere (*Ribes sanguineum*), (a) Blattunterseite mit starker Behaarung der gesamten Blattfläche inkl. der Blattnervatur; (b) Blattnerv auf der Blattunterseite mit maximal anhaftendem Feinstaub; (c) Blattnerv auf der Blattunterseite mit maximal anhaftendem Mittelstaub.

Im Rahmen der Bestäubungsversuche durchgeführten quantitativen Bestimmung des maximalen Staubfangvermögens wiesen knapp 85 % der untersuchten Arten einen Staubauftrag von unter 1 mg/cm² PM10 auf (Kap. 3.1).

Durch Transmissionsmessungen an Blattober- und -unterseiten bestaubter und unbestaubter Blattproben zeigte sich, dass bei einem Staubauftrag von 1 mg/cm² PM10 auf Blattoberseiten eine Reduktion der Transmission von rund 35 % und auf Blattunterseiten von rund 45 % zu erwarten war (Abb. 54). Bei dieser Korrelation wurde deutlich, dass ein Staubauftrag auf der Blattoberseite im Allgemeinen einen stärkeren reduzierenden Einfluss auf die Transmission ausübte, als die äquivalente Menge an Staub auf der Blattunterseite (Abb. 54).

Die Ergebnisse aus Kapitel 3.2.1.1 über den Einfluss verschiedener Staubmchtigkeiten auf die Transmission, die auf einer Glasplatte durchgeführt wurden, weichen von den an lebendigen Pflanzenoberflächen deutlich ab. Eine allgemeine gültige Aussage über einen Staubauftrag ist offenbar aufgrund der großen biologischen Diversität nicht möglich. Die Blattflächen sind sehr inhomogen durch Blattnervatur, Haare u.ä. (Bsp. u.a. Abb. 53) und sehr strukturiert, so dass Partikel auch nicht gleich verteilt auf den Pflanzenoberflächen gebunden werden. Somit ist auch der Einfluss auf die Lichtverhältnisse des Blattes sehr unterschiedlich.

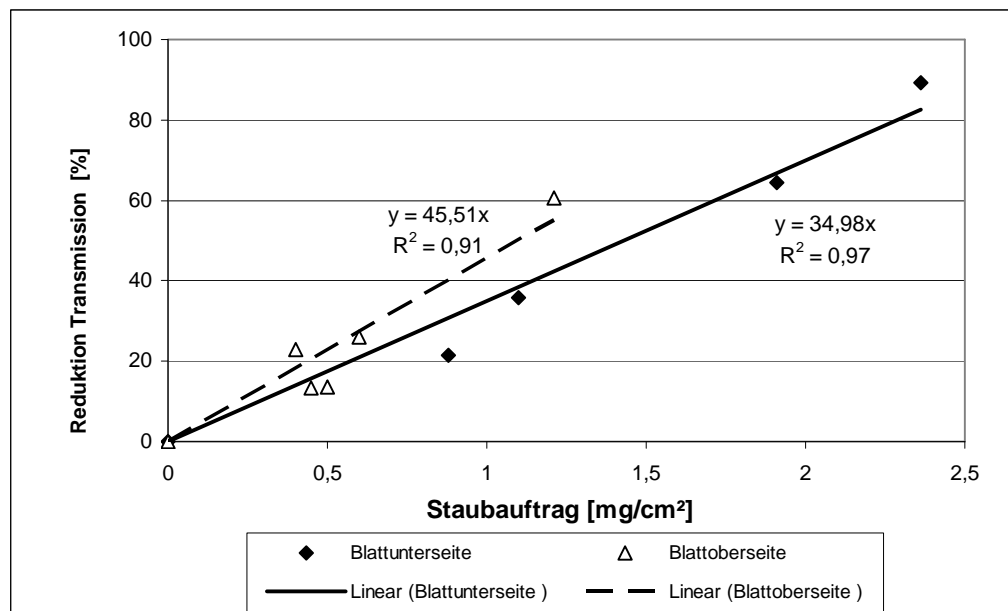


Abb.54: Korrelation zwischen maximaler Feinstaubauflagerung und der daraus resultierenden Reduktion der Transmission gemessen an verschiedenen Pflanzen differenziert nach Blattoberseite und Blattunterseite

Die Insertion der Blätter an Ästen im Bestand bestimmt weitestgehend den Lichtgenuss desselbigen. Die meisten Blätter sind so ausgerichtet, dass Lichtstrahlen senkrecht auf die Blattoberflächen gelangen. Abhängig von verschiedenen Parametern wie unter anderem der Starrheit des Blattstiels und des Winkels zum Ast hin sowie Windbewegungen unterschiedlicher Art wie z.B. natürliche Böen als auch durch Kraftfahrzeuge anthropogen erzeugte Wirbel in direkter Nähe zur Straße, werden Blätter bewegt und Blattunterseiten werden direkt von Sonnenstrahlen betroffen, die diese nutzen können.

Allgemein können durch Regenereignisse Staubauflagen entfernt werden. Die Blattunterseiten sind in der Regel von den Reinigungseffekten nicht betroffen, da Regentropfen eher von oben auf die Blattoberfläche gelangen. Denkbar wäre eine Entfernung von Partikeln durch Spritzwasser, welches vom Boden zurück an die Pflanzen und so auf die Blattunterseite gelangt.

3.3 Wirkung von Staubauflagerungen auf Blättern auf die Photosynthese - differenziert nach Mittel- und Feinstaub

Staubauflagerungen auf Pflanzen können eine Vielzahl von Reaktionen auslösen.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden mittels Chlorophyllfluoreszenz verschiedene Parameter erhoben, die u.a. Aufschluss über den Einfluss der Stäube auf die primären Lichtreaktionen der Photosynthese geben sollten.

3.3.1 Absorption

Trifft Licht auf die Oberfläche eines Blattes, so wird der Hauptteil der Strahlung absorbiert. Als Standard werden bei der Verwendung der Teaching-PAM 0,84 angegeben, d.h. rund 84 % des Lichtes wird absorbiert. In der Regel werden 60 bis 80% der Strahlung je nach Aufbau und Struktur der Mesophyllzellen absorbiert (LARCHER 2001). Mit der Imaging-PAM war es möglich, die Absorption exakt zu bestimmen und somit Einflüsse auf diese auch visuell sichtbar zu machen.

Abhängig von den Oberflächeneigenschaften der Blätter, schwankte auch die Absorption der unbestaubten Proben ein wenig. Die erhobenen Absorptionswerte wurden durch Anregung im Rotlichtbereich (650 nm) ermittelt, was einem der Absorptionsmaxima der Chlorophylle entspricht. Die somit durch optimale Anregung erzielten Absorptionen waren im Mittel etwas gegenüber den Werten, die über das gesamte sichtbare Lichtspektrum erfassten Werte, erhöht.

Staubauflagerungen, ob nun Feinstaub oder Mittelstaub, senkten die Absorption mitunter erheblich (*Abb. 55*). Je mehr Staub auf den Oberflächen haften blieb, desto stärker war der Einfluss auf die Absorption. Visuell ließ sich dies anhand der reduzierten Absorption durch die Staubaufgabe ausmachen (grünliche Bereiche, *Abb.55 e, f*).

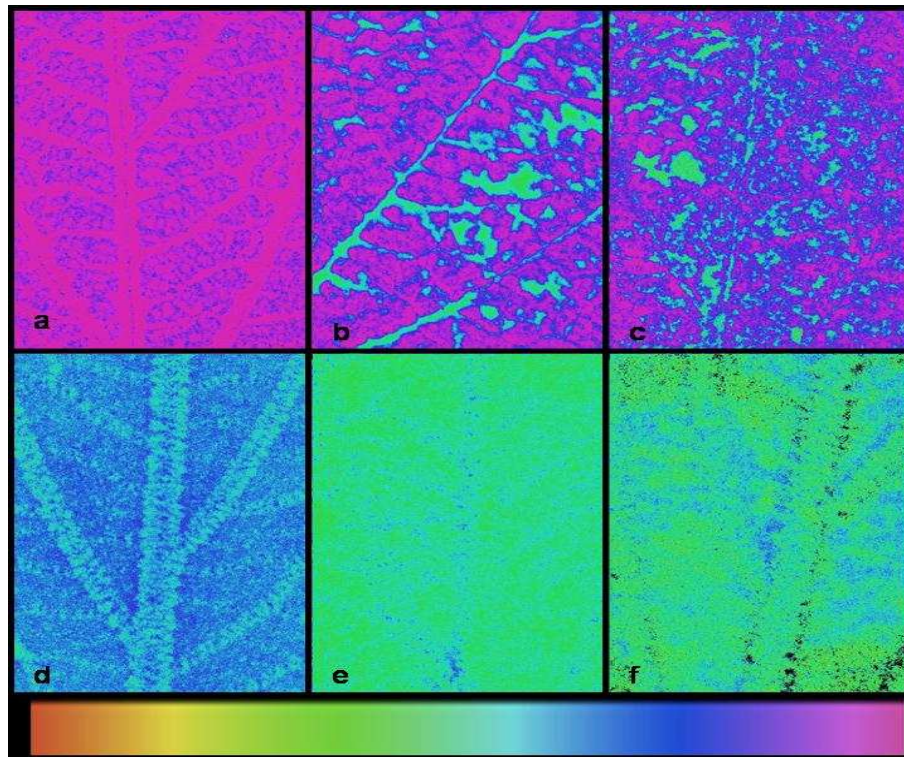


Abb. 55: Absorptionskoeffizienten (Legende: schwarz = 0 bis violett = 1) von Blattflächen von *Viburnum rhytidophyllum* (a)-(c) Blattoberseite und (d)-(f) Blattunterseite. (a) Kontroll-oberseite, (b) mit Mittelstaub bestäubt, (c) mit Feinstaub bestäubt, (d) Kontrollunterseite, (e) mit Mittelstaub bestäubt und (f) mit Feinstaub bestäubt.

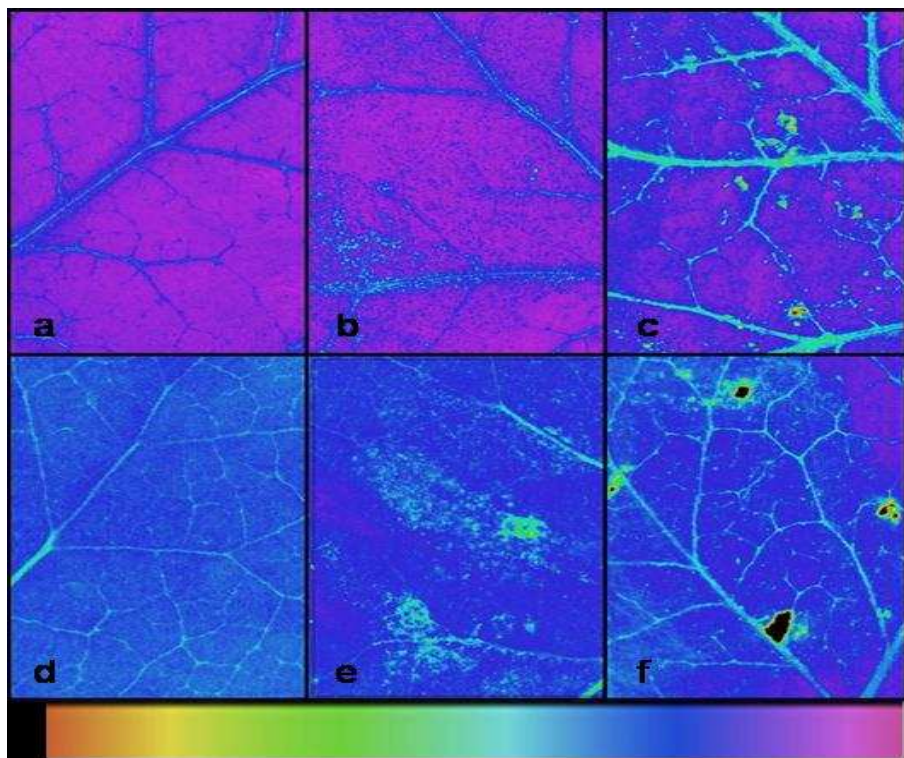


Abb. 56: Absorptionskoeffizienten (Legende: schwarz = 0 bis violett = 1) von Blattflächen von *Hedera helix* (a)-(c) Blattoberseite und (d)-(f) Blattunterseite. (a) Kontroll-oberseite, (b) mit Mittelstaub bestäubt, (c) mit Feinstaub bestäubt, (d) Kontrollunterseite, (e) mit Mittelstaub bestäubt und (f) mit Feinstaub bestäubt.

Bei sehr stark behaarten Oberflächen wie beispielsweise beim Runzelblättrigen Schneeball beeinflussten die Haare bereits bei unbestaubten Proben die Absorption (Abb. 55d), deutlich ließ sich hier die kräftig behaarte Blattaderung anhand der reduzierten Absorption erkennen. In dieser ausgeprägten Behaarung hielt sich auffällig viel Staub, unabhängig ob Fein- oder Mittelstaub, so dass sich dies in einer flächig reduzierten Absorption niederschlug und optisch sehr gut sichtbar war (Abb. 55 e, f). Bei *Viburnum rhytidophyllum* waren auf der Oberseite geballte Anhäufungen von Staub erkennbar. Auch hier sammelte sich der Staub zudem in den abgesenkten Blattadern, in denen sich viele Haare fanden. Ein deutlicher Unterschied im Haltevermögen war bei sehr glatten Oberflächen wie bei *Hedera helix* festzustellen, hier hielt sich nur ein geringer Teil der Staubes in den Blattadern, ansonsten blieb die Blattfläche nahe unbedeckt von Staub (Abb. 56).

So zeigten sich bei Untersuchungen an bestaubten und unbestaubten Blättern von *Rhododendron catawbiense* eine um den Faktor 10 vergrößerte Absorption bei der bestaubten Variante, während die Transmission als auch die Reflexion stark erniedrigt wurde (ELLER & BRUNNER 1975). Eine gesteigerte Absorption im Bereich der bestaubten Oberflächen hat meist eine erhöhte Blattemperatur zur Folge, die wiederum direkten Einfluss auf die Physiologie des Blattes ausübt. Viele enzymatische Abläufe unterliegen einem Temperaturoptimum, welches durch Überhitzung geschädigt werden kann. Dabei ist die Farbe des Auftrages entscheidend. Untersuchungen an Pflanzen an einer verkehrsreichen Straße in Zürich zeigten einen visuell sichtbaren schwarzen Belag auf, der wiederum zu Hitzeschäden bei Pflanzen führt (ELLER & WILLI 1977).

Die Absorption der Blattoberseiten lag bei den untersuchten Arten stets höher als die der Blattunterseite (Tab.21). So konnten Reduktionen der Absorption auf Blattunterseiten zwischen 8% (*Acer pseudoplatanus*) und 34% (*Viburnum rhytidophyllum*) festgestellt werden.

Eine deutliche Blattbehaarung liegt oftmals auf den Blattunterseiten der Pflanzen vor, was vornehmlich dem Transpirationsschutz dient, da die meisten Pflanzen hypostomatische Blätter besitzen, d.h. dass die Stomata nur auf der Blattunterseite inseriert sind. Dichte Behaarung ändert somit auch den Lichtgenuss der Blätter, da die Reflexion und die diffuse Streuung des Lichts erhöht werden.

Im Mittel war die Reduktion der Absorption durch Auftrag von Feinstaub auf Blattober- und -unterseite höher, als durch Mittelstaubauftrag (Tab. 21). Bei den meisten der untersuchten Arten ließen sich höchst signifikante Reduktionen der Absorption nach Bestäubung der Blätter feststellen. Insgesamt konnten die höchsten Reduktionen der Absorption auf der Blattunterseite von *Sorbus intermedia* von 49 % bei Mittelstaub und 62 % bei Feinstaub festgestellt werden (Abb. 57).

Eindeutig bestand ein Zusammenhang zwischen deutlicher Reduktion der Absorption und Behaarung der Blattflächen.

Deutlich waren die optischen Veränderungen auf den Blatthälften von *Sorbus intermedia* durch Staubauftrag zu erkennen. Auf den Blattunterseiten waren die Einflüsse besonders deutlich, dort wo eine mächtige Staubschicht abgelagert wurde, konnte in einigen Fällen die Absorption gänzlich zum Erliegen kommen, was sich farblich an den schwarzen Bereichen lokalisieren ließ (Abb. 57 e,f).

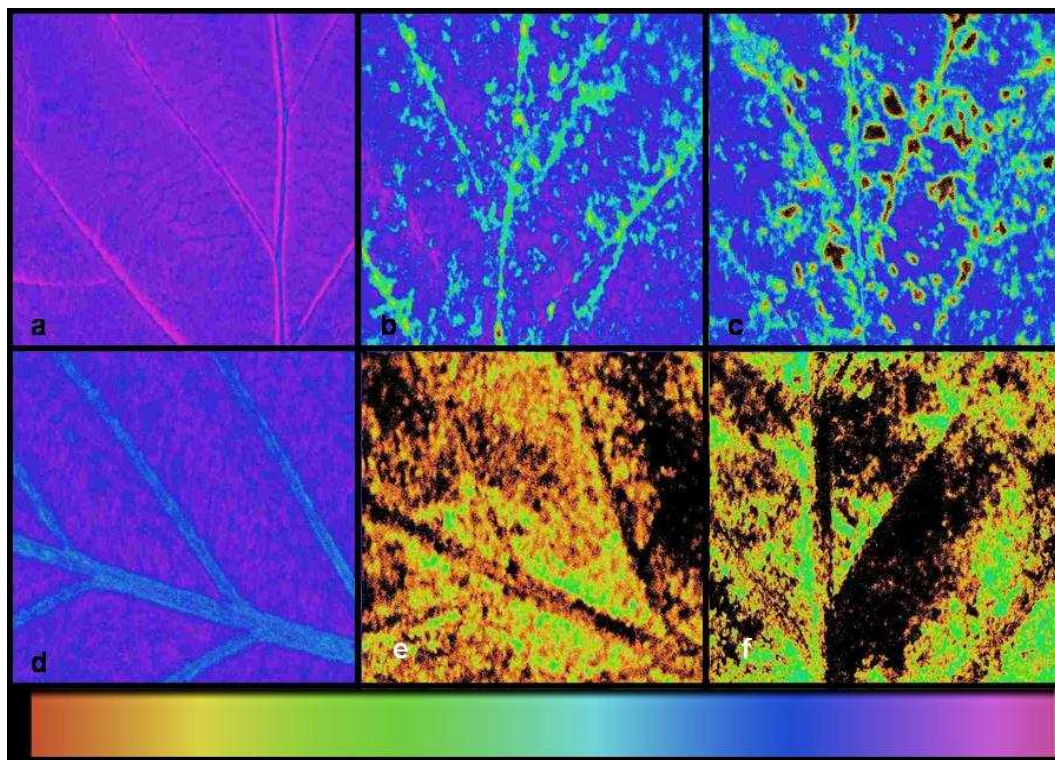


Abb. 57: Absorptionskoeffizienten (Legende: schwarz = 0 bis violett = 1) von Blattflächen von *Sorbus intermedia* (a)-(c) Blattoberseite und (d)-(f) Blattunterseite. (a) Kontrolloberseite, (b) mit Mittelstaub bestäubt, (c) mit Feinstaub bestäubt, (d) Kontrollunterseite, (e) mit Mittelstaub bestäubt und (f) mit Feinstaub bestäubt.

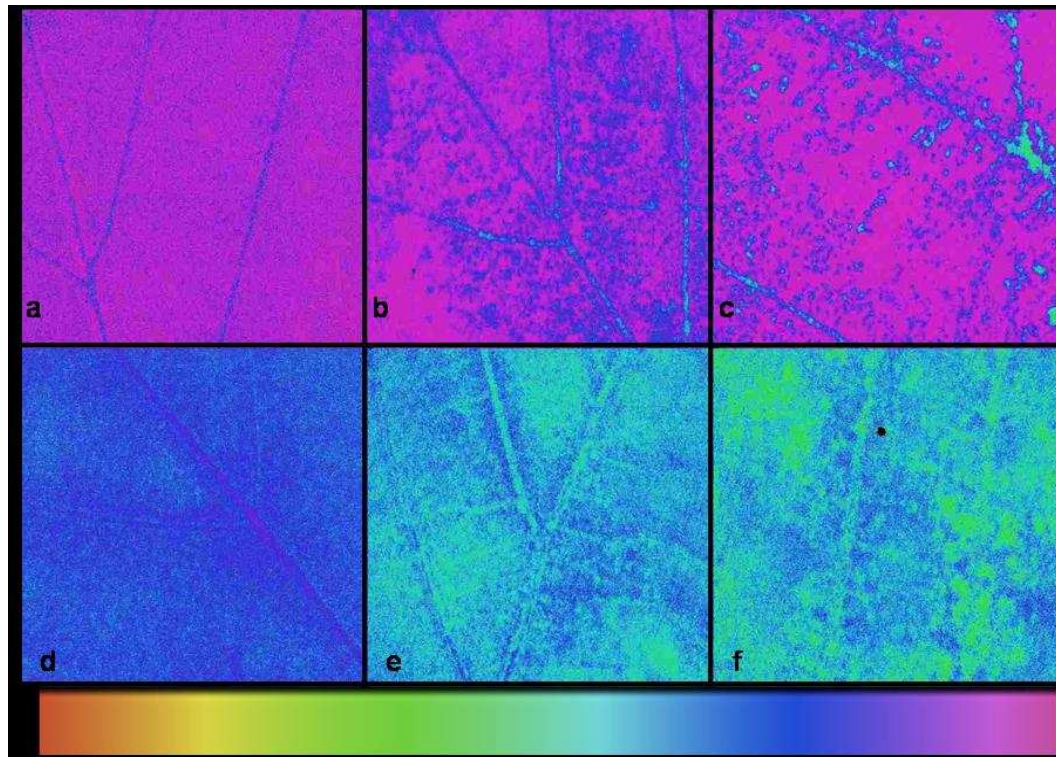


Abb. 58: Absorptionskoeffizienten (Legende: schwarz = 0 bis violett = 1) von Blattflächen von *Tilia tomentosa* **(a)-(c)** Blattoberseite und **(d)-(f)** Blattunterseite. **(a)** Kontrolloberseite, **(b)** mit Mittelstaub bestäubt, **(c)** mit Feinstaub bestäubt, **(d)** Kontrollunterseite, **(e)** mit Mittelstaub bestäubt und **(f)** mit Feinstaub bestäubt.

Bei *Tilia tomentosa* ließ sich durch maximal anhaftenden Staubauftrag mit Mittel- als auch Feinstaub auf der Blattoberseite keine signifikante Reduktion der Absorption messen (Abb. 58 a-c).

Wurde hingegen die Blattunterseite mit beiden Stäuben versehen, so wirkte sich dieses auf die Absorption aus, sie wurde signifikant reduziert (Abb. 58 d-f). Die Partikel konnten sich aufgrund der recht glatten Oberseite des Blattes nicht halten, gerade bei Feinstaub konnte man beobachten, dass sich dieser in den Blattadern niederließ, da diese in der Regel eingesenkt und mit Haaren versehen waren. Wie in Abbildung 58c ersichtlich, lagerten sich Partikel im Feinstaubbereich zudem in den Abzweigungen der Blattnervatur ab (türkise Bereiche).

Die Interkostalfelder waren nur wenig mit Staub benetzt, so dass bei dieser Spezies kein signifikanter Einfluss auf die Absorption feststellbar war. Auf der Blattunterseite blieb deutlich mehr Staub haften, aufgrund der starken Behaarung (Abb. 59).

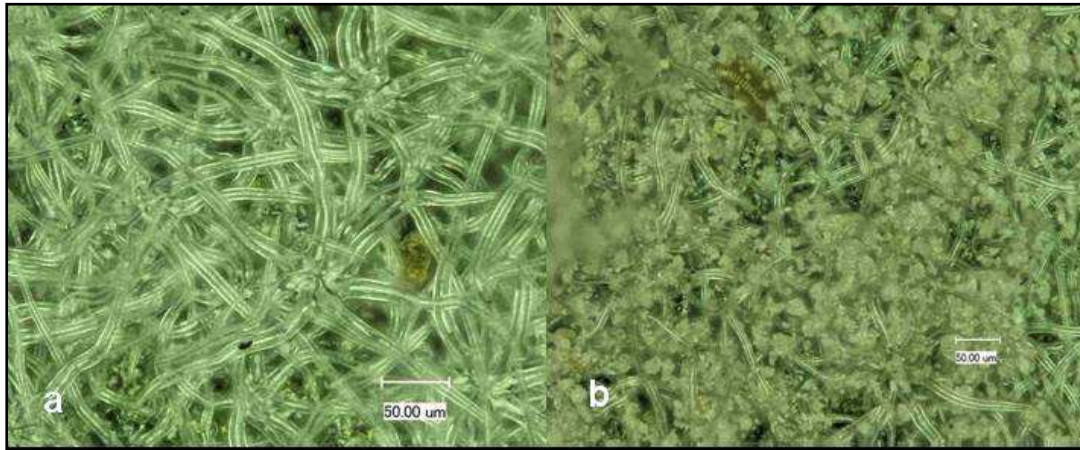


Abb. 59: Blattunterseiten von *Tilia tomentosa* **(a)** dichte Behaarung mit Schildhaaren **(b)** bestäubt mit Feinstaub

Der Staubauftrag auf der Unterseite war mehr oder weniger gleichmäßig verteilt (Abb. 59 b) und führte somit zu einer flächigen und signifikanten Reduktion der Absorption (Abb. 58 d-f). Die weißen, toten Schildhaare steigerten zudem die Reflexion, so dass die Absorption bereits bei unbestäubten Kontrollblättern auf der Unterseite reduziert war.

Insgesamt konnte auf Blattoberseiten durch Feinstaubauftrag eine Reduktion der Absorption zwischen 4 und 32 %, durch Mittelstaub zwischen 4 und 23% festgestellt werden (Tab. 21). Auf den Blattunterseiten war der Einfluss auf die Absorption allgemein größer und lag für PM 10 im Bereich zwischen 2-48 % und für Mittelstaub zwischen 8 und 62% (Tab. 22). Allgemein konnte mit Ausnahme einer Pflanze (*Tilia tomentosa*) bei allen untersuchten Arten ein signifikanter Einfluss und eine Reduktion der Absorption auf beiden Blathälften und mit Fein- als auch Mittelstäuben festgestellt werden. Blattoberseiten waren in der Regel deutlich schwächer bis gar nicht behaart, so dass an diesen Oberflächen generell weniger Staub haften blieb, es dort jedoch zu den größten Absorptionsreduktionen kam, beispielsweise bei *Quercus rubra* um 32 % und bei *Carpinus betulus* um 26 %. Auf den Blattunterseiten blieb aufgrund der ausgeprägten Behaarung deutlich mehr Staub haften, der zu den stärksten Abschwächungen der Absorption führte, beispielsweise bei *Sorbus intermedia* für PM10 48 % und für Mittelstaub bei *Corylus colurna* 62 %.

Tab. 21: Absorptionskoeffizienten von Blattflächen (Blattoberseite) ausgewählter Pflanzenarten bei maximaler, speziesspezifischer Bestäubung von Mittel- bzw. Feinstaub im Vergleich zur Kontrolle. Dargestellt sind Mittel-werte (n=6) und die Reduktion der Absorption in % durch Staubauflagerungen. Die Unterschiede der Reduktion der Absorptionskoeffizienten zwischen unbestäubter Kontrolle und den jeweiligen Stäuben versetzten Blättern sind höchst signifikant (***), hoch signifikant (**), signifikant (*) und nicht signifikant (ns).

	Blattoberseite											
	Kontrolle		Feinstaub		Mittelstaub		Reduktion %		SD		Reduktion %	
	MW	SD	MW	SD	MW	SD	MW	SD	MW	SD	MW	SD
<i>Acer platanoides</i>	0,95	0,00	0,91	0,02	0,9	0,02	4,21(***)	0,02	0,9	0,02	5,26(**)	0,02
<i>Buddleja davidii</i>	0,95	0,01	0,87	0,07	0,87	0,07	8,42(*)	0,07	0,87	0,04	8,42(**)	0,04
<i>Carpinus betulus</i>	0,83	0,01	0,61	0,09	0,64	0,09	26,50(***)	0,09	0,64	0,07	22,89(***)	0,07
<i>Corylus colurna</i>	0,83	0,02	0,69	0,07	0,71	0,07	16,86(***)	0,07	0,71	0,12	14,45(*)	0,12
<i>Fagus sylvatica</i>	0,8	0,02	0,64	0,04	0,74	0,04	20(***)	0,04	0,74	0,03	7,5(**)	0,03
<i>Fraxinus excelsior</i>	0,85	0,01	0,74	0,01	0,78	0,01	12,94(***)	0,01	0,78	0,05	8,23(*)	0,05
<i>Hedera helix</i>	0,85	0,01	0,77	0,02	0,81	0,02	9,41(***)	0,02	0,81	0,04	4,70(*)	0,04
<i>Quercus rubra</i>	0,85	0,02	0,58	0,07	0,68	0,07	31,76(***)	0,07	0,68	0,07	20(***)	0,07
<i>Ribes sanguineum</i>	0,95	0,00	0,84	0,05	0,9	0,05	11,58(***)	0,05	0,9	0,03	5,26(**)	0,03
<i>Sorbus intermedia</i>	0,86	0,04	0,74	0,08	0,75	0,08	13,95(*)	0,08	0,75	0,02	12,79(***)	0,02
<i>Tilia tomentosa</i>	0,91	0,02	0,79	0,18	0,86	0,18	13,18(ns)	0,18	0,86	0,06	5,49(ns)	0,06
<i>Viburnum rhytidophyllum</i>	0,95	0,01	0,85	0,05	0,89	0,05	10,53(***)	0,05	0,89	0,05	6,31(*)	0,05

Tab. 22: Absorptionskoeffizienten von Blattflächen (Blattunterseite) ausgewählter Pflanzenarten bei maximaler, speziesspezifischer Bestäubung von Mittel- bzw. Feinstaub im Vergleich zur Kontrolle. Dargestellt sind Mittelwerte (n=6) und die Reduktion der Absorption in % durch Staubauflagerungen. Die Unterschiede der Reduktion der Absorptionskoeffizienten zwischen unbestäubter Kontrolle und den jeweiligen Stäuben versetzten Blättern sind höchst signifikant (***), hoch signifikant (**), signifikant (*) und nicht signifikant (ns).

	Blattunterseite											
	Kontrolle		Feinstaub		Mittelstaub		Reduktion %	SD	MW	SD	Reduktion %	
	MW	SD	MW	SD	MW	SD						
<i>Acer platanoides</i>	0,87	0,01	0,8	0,03	0,75	0,04	8,05(***)	0,03	0,75	0,04	13,79(***)	
<i>Buddleja davidii</i>	0,65	0,08	0,53	0,1	0,48	0,16	18,46(ns)	0,1	0,48	0,16	26,15(*)	
<i>Carpinus betulus</i>	0,74	0,02	0,55	0,05	0,57	0,07	25,67(***)	0,05	0,57	0,07	22,97(***)	
<i>Corylus colurna</i>	0,7	0,03	0,52	0,08	0,61	0,05	25,71(***)	0,08	0,61	0,05	12,85(**)	
<i>Fagus sylvatica</i>	0,72	0,03	0,53	0,03	0,63	0,05	26,38(***)	0,07	0,63	0,05	12,5(**)	
<i>Fraxinus excelsior</i>	0,77	0,01	0,62	0,03	0,71	0,07	19,48(***)	0,03	0,71	0,07	7,79(ns)	
<i>Hedera helix</i>	0,74	0,03	0,72	0,02	0,67	0,07	2,70(ns)	0,02	0,67	0,07	9,45(ns)	
<i>Quercus rubra</i>	0,73	0,02	0,42	0,05	0,46	0,1	42,46(***)	0,05	0,46	0,1	36,98(***)	
<i>Ribes sanguineum</i>	0,85	0,01	0,53	0,1	0,69	0,1	37,64(***)	0,1	0,69	0,1	18,82(**)	
<i>Sorbus intermedia</i>	0,64	0,11	0,33	0,24	0,24	0,11	48,44(ns)	0,24	0,24	0,11	62,5(***)	
<i>Tilia tomentosa</i>	0,7	0,06	0,59	0,03	0,58	0,03	15,71(**)	0,03	0,58	0,03	17,14(**)	
<i>Viburnum rhytidophyllum</i>	0,62	0,02	0,48	0,03	0,48	0,02	22,58(***)	0,03	0,48	0,02	22,58(***)	

3.3.2 Elektronentransportraten

Die photochemischen Prozesse in einer Pflanze reagieren primär auf das Strahlungsangebot, während die biochemischen Prozesse auch von der Temperatur, dem Wasser- und Mineralstoffangebot als auch der CO₂-Versorgung abhängen (LARCHER 2001).

Bestrahlt man Blätter mit steigenden Lichtintensitäten, so folgen eine direkt proportional steigende CO₂-Aufnahme und eine steigende Nettophotosynthese, die einer Sättigungskurve folgt. Genauso verhält es sich bei Lichtabhängigkeitskurven zur Elektronentransportrate. Die Kurve steigt zunächst linear steil an. Je steiler die Steigung, desto besser ist die Quantenausbeute. Bei stärkerer Bestrahlung nähert sich die Leistung einem Sättigungspunkt an, über den hinaus die Geschwindigkeit der CO₂ Aufnahme nur noch durch enzymatische Vorgänge begrenzt ist (LARCHER 2001). Pflanzen haben sich aufgrund ihres natürlich am Standort vorkommenden Lichtgenusses angepasst und haben unterschiedliche Strategien entwickelt, das Licht optimal zu nutzen. In der Literatur werden beispielsweise für Lichtblätter sommergrüner Laubblätter von Holzpflanzen Lichtsättigungswerte zwischen 600 und 800 $\mu\text{mol Photonen/m}^2\text{s}$ angegeben (LARCHER 2001). Sonnenblätter von *Fagus sylvatica* weisen bereits eine Lichtsättigung bei 85 $\mu\text{mol Photonen/m}^2\text{s}$ auf, währenddessen bei *Hedera helix* erst bei 600 $\mu\text{mol Photonen/m}^2\text{s}$ eine Lichtsättigung erreicht wird (HOFLACHER & BAUER 1982, LICHTENTHALER et al. 1981). Die meisten der untersuchten Pflanzen wuchsen im städtischen Bereich, wo bekanntermaßen eine Veränderung der Globalstrahlung gegenüber dem Umland von minus 20% vorherrscht, zudem ist die Sonnenscheindauer im Sommer im urbanen Raum um rund 10% reduziert (KUTTLER 1998).

Die Lichtansprüche von Pflanzen sind sehr variabel und verschieden und sind von den Standortansprüchen der Pflanze abhängig. Für die im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Arten wurde eine festgelegte höhere Lichtintensität für weitergehende Untersuchungen bestimmt. Geräte bedingt ließen sich nur einzelne Lichtstufen einstellen, so dass die gewählte Lichtstufe bei 366 $\mu\text{mol Photonen/m}^2\text{s}$ lag.

3.3.2.1 Elektronentransportraten von Lichtkurven

An ausgewählten Pflanzenspezies wurden von Blättern Lichtkurven gefahren, die einmal unbestäubte Kontrollblätter umfassten und im Anschluss mit Mittelstaub versehene Blattproben.

Generell waren die Elektronentransportraten von Blattoberseiten höher als die der Blattunterseiten. Unter natürlichen Bedingungen gelangt das Licht der Sonne auf die Oberseite des Blattes, so dass die Blattmorphologie dahingehend ausgerichtet ist. Die meisten Blätter sind bifazial aufgebaut, d.h. es wird eine Ober- und Unterseite ausgebildet. Bei dorsiventralen Blättern befindet sich das Palisadenparenchym oben und das Schwammparenchym unten. Die Unterschiede der Elektronentransportrate von Ober- und Unterseite sind dahingehend erklärbar.

Besonders behaarte Blattflächen bedingten bei Durchführung von Lichtkurven oftmals eine signifikante Erniedrigung der Elektronentransportrate. Dies ging einher mit einem deutlich stärkeren Staubfangvermögen solcher Strukturen, die somit eine signifikante Beschattung des Chloroplasten enthaltenen Mesophylls bewirkten.



Abb. 60: Blattunterseiten von *Sorbus intermedia* (a) dichte Behaarung mit Einfachhaaren, (b) mit Mittelstaub bestäubt.

Bei *Sorbus intermedia* konnten Werte von $0,27 \pm 0,07$ mg/cm² auf der Blattoberseite und $1,10 \pm 0,12$ mg/cm² auf der Blattunterseite festgestellt werden, was einem guten Staubfangvermögen entspricht. Der Staubauftrag, der sich innerhalb der komplexen Haarstrukturen auf der Blattunterseite befand (Abb. 60), beeinträchtigte somit den Lichtgenuss des Blattes, sowohl auf der Blattober- als auch -unterseite (Abb. 61), wobei die Blattunterseite stärker betroffen war.

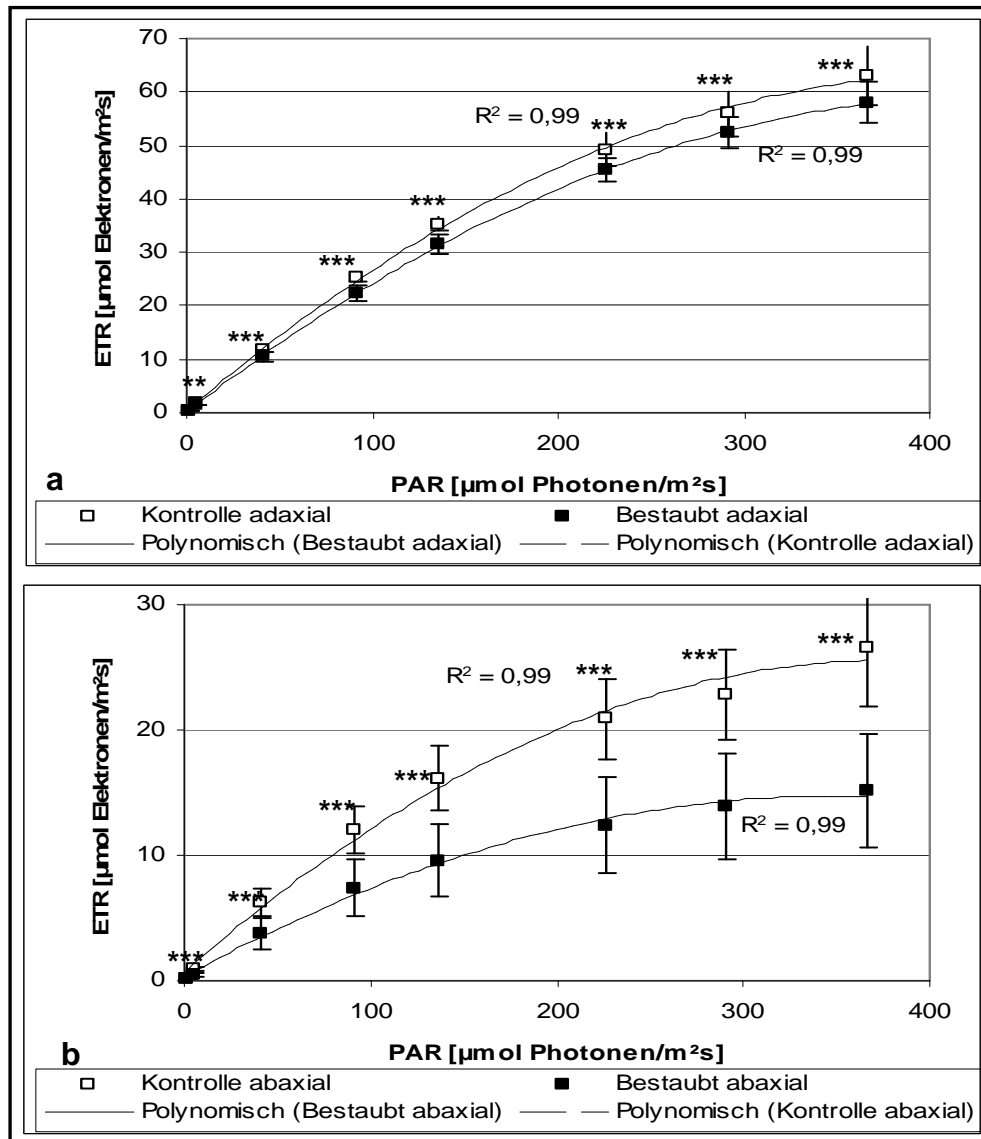


Abb.61: (a) und (b) Elektronentransportraten [ETR] bei steigender Lichtintensität (Lichtkurven) von Blättern von *Sorbus intermedia*. (a) Blattoberseiten (adaxial) bestaubt mit Mittelstaub und unbestaubter Kontrolle, (b) Blattunterseiten (abaxial) bestaubt mit Mittelstaub. Dargestellt sind Mittelwerte ($n=8$) mit SD, Trendlinie und Regressionskoeffizient. Die Unterschiede der ETR zwischen unbestaubter Kontrolle und mit Mittelstaub bestaubter Oberfläche sind höchst signifikant (***)

Durch die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen konnte der Einfluss auf die primären Lichtreaktionen der Photosynthese durch einen dichten Staubauftrag auf Blättern belegt werden. Dabei zeigte sich eine Reduktion nur in Verbindung mit größeren Auflagerungen und dichter Behaarung.

Bei sehr geringen und gleichermaßen auch steigenden Lichtintensitäten wurde die Elektronentransportrate gehemmt (Abb. 61). Bereits in den sehr geringen Lichtstufen zwischen 1-41 PAR war die Reduktion signifikant.

Es zeigte sich, dass die unterschiedlichen Lichtansprüche der Arten zudem das Ausmaß der Beeinträchtigung durch Staubauflagerungen beeinflussten. Besonders Lichtbaumarten, wozu *Sorbus intermedia* zählt, wurden durch einen Staubauftrag in der Regel stärker in ihrer Photosyntheseleistung gehemmt als Schattbaumarten. Lichtbaumarten benötigen 1/5-1/10 des Außenlichts um gedeihen zu können. Lichtblätter zeichnen sich durch ein ausgeprägteres Palisadenparenchym als auch einer erhöhten Chloroplastenanzahl pro Blattfläche aus (LARCHER 2001). Allgemein ist die Photosyntheseleistung erhöht und auf hohe Lichtintensitäten eingestellt, so dass das Elektronentransportsystem in Verbindung mit einer hohen Carboxylaseaktivität höhere Ausbeuten erzielen kann.

Waren die Blattflächen mit Stäuben kontaminiert, so sanken die für die Lichtarten benötigten hohen Lichtintensitäten derart, dass sie signifikant in ihrer Photosyntheseleistung beeinflusst wurden (Abb. 61).

Dieser Zusammenhang konnte ebenfalls an *Tilia tomentosa* gezeigt werden. Die Silberlinde war auf der Blattunterseite sehr dicht mit Schildhaaren versehen, die einen Staubauftrag von $0,4 \pm 0,04 \text{ mg/cm}^2$ für Mittelstaub bedingten. *Tilia tomentosa* zählt zu den Lichtbaumarten und zeigte bei Bestäubung einen signifikanten Rückgang der Elektronentransportraten zunächst in den schwachen Lichtintensitäten, bei steigenden Lichtintensitäten blieb die ETR der bestaubten Blattflächen signifikant niedriger als bei den unbestaubten Kontrollblättern (Abb. 62). Wurde die Blattoberseite mit Staub bedeckt, so sank die ETR deutlicher als wenn die Blattunterseite mit Staub bedeckt wurde. Bei *Tilia tomentosa* wurde die ETR bis zu über 25 % gesenkt (Abb. 62). Die Gründe hierfür lagen zum einen an der Beschattung des Gewebes und zum anderen an dem hohen Lichtanspruch dieser Art. Die Ursache verminderter Assimilationsleistung staubüberzogener Blattoberflächen liegt im geringeren Lichtdurchtritt zu den Assimilationsorganen und in einer erhöhten Absorption infraroter Strahlung (BERGMANN-LEHNERT 1962, FLÜCKIGER et al. 1977, GARBER 1974). Der sich daraus ergebene Temperaturanstieg kann die Photosyntheseaktivität herabsetzen und die Atmung erhöhen (STEINHÜBEL & HALAS 1967).

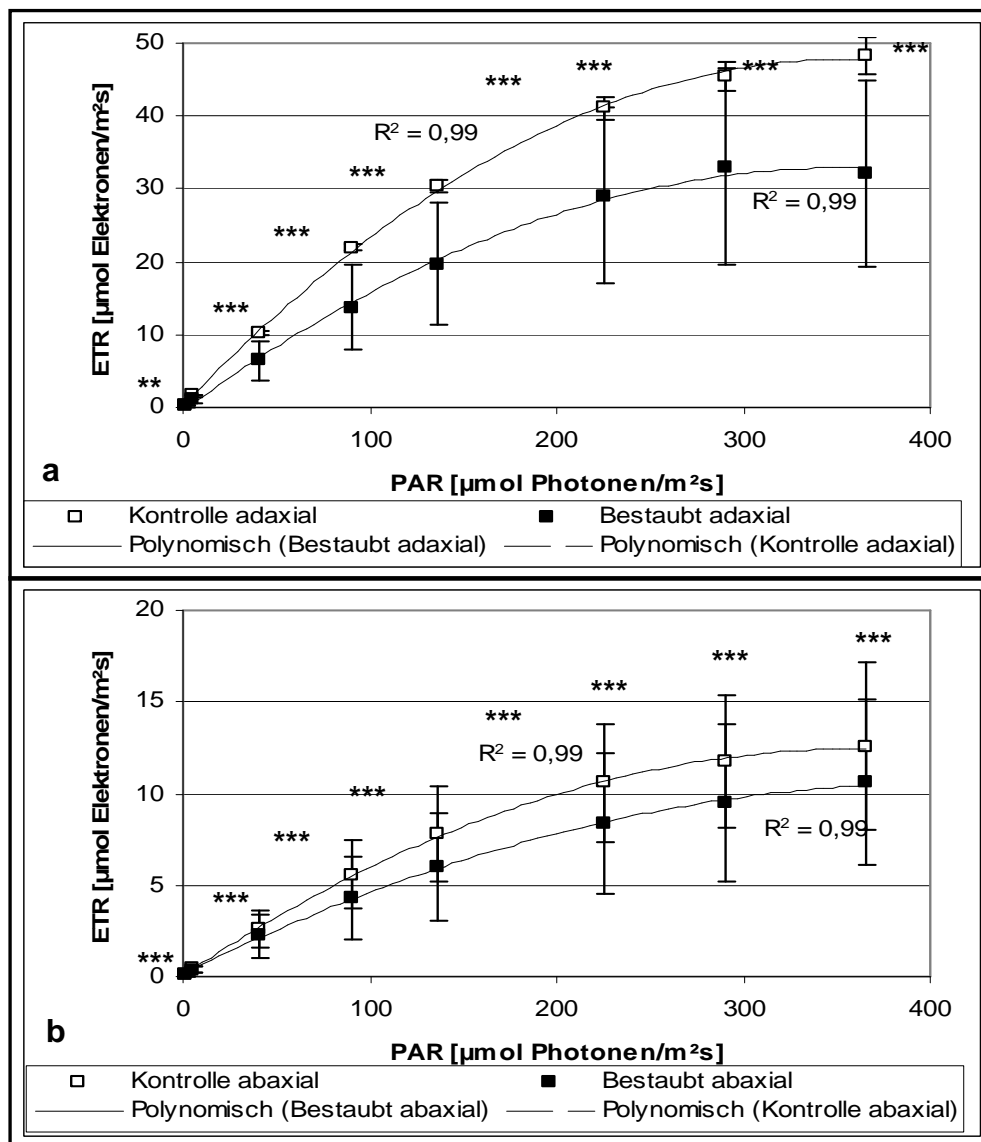


Abb.62: (a) und (b) Elektronentransportraten [ETR] bei steigender Lichtintensität (Lichtkurven) von Blättern von *Tilia tomentosa*. (a) Blattoberseiten (adaxial) bestaubt mit Mittelstaub und unbestaubter Kontrolle, (b) Blattunterseiten (abaxial) bestaubt mit Mittelstaub. Dargestellt sind Mittelwerte ($n=8$) mit SD, Trendlinie und Regressionskoeffizient. Die Unterschiede der ETR zwischen unbestaubter Kontrolle und mit Mittelstaub bestaubter Oberfläche sind höchst signifikant (***)

Bei weiteren Arten, die kaum bis mäßig behaart waren, wie beispielsweise *Dracaena marginata*, *Ficus benjamini* als auch bei *Hedera helix* war kein signifikanter Einfluss von Mittelstaubauflagerungen auf die primären Lichtreaktionen der Photosynthese bei steigenden Lichtintensitäten (Lichtkurven) feststellbar.

Die ermittelte Staubmenge auf den Blättern betrug bei *Dracaena marginata* $0,18 \pm 0,03 \text{ mg/cm}^2$ für Mittelstaub auf der Blattoberseite und $0,21 \pm 0,03 \text{ mg/cm}^2$ auf der Blattunterseite, was einem eher geringen Staubfangvermögen entspricht. Die einzelnen Partikel lagen locker verteilt auf der Blattoberfläche und beeinträchtigten die Lichteinstrahlung somit nicht (Abb. 64). Gerade bei niedrigen Strahlungs-

intensitäten im Bereich von 5- 41 $\mu\text{mol Photonen/m}^2\text{s}$ würde man einen signifikante Erniedrigung durch Staubauftrag erwarten. Dies spricht bei einem Teil der untersuchten Arten dafür, dass die Staubschicht nicht flächendeckend auf den sehr glatten Oberflächen war und somit keine nennenswerte Beeinflussung ausübte. Die große Streuung innerhalb der Messungen bestätigte zudem, dass eine flächige Beeinflussung nicht gegeben war und Staubkörner nur vereinzelt die Elektronentransportrate beeinflussten, jedoch insgesamt keine signifikante Schwächung verursachten.

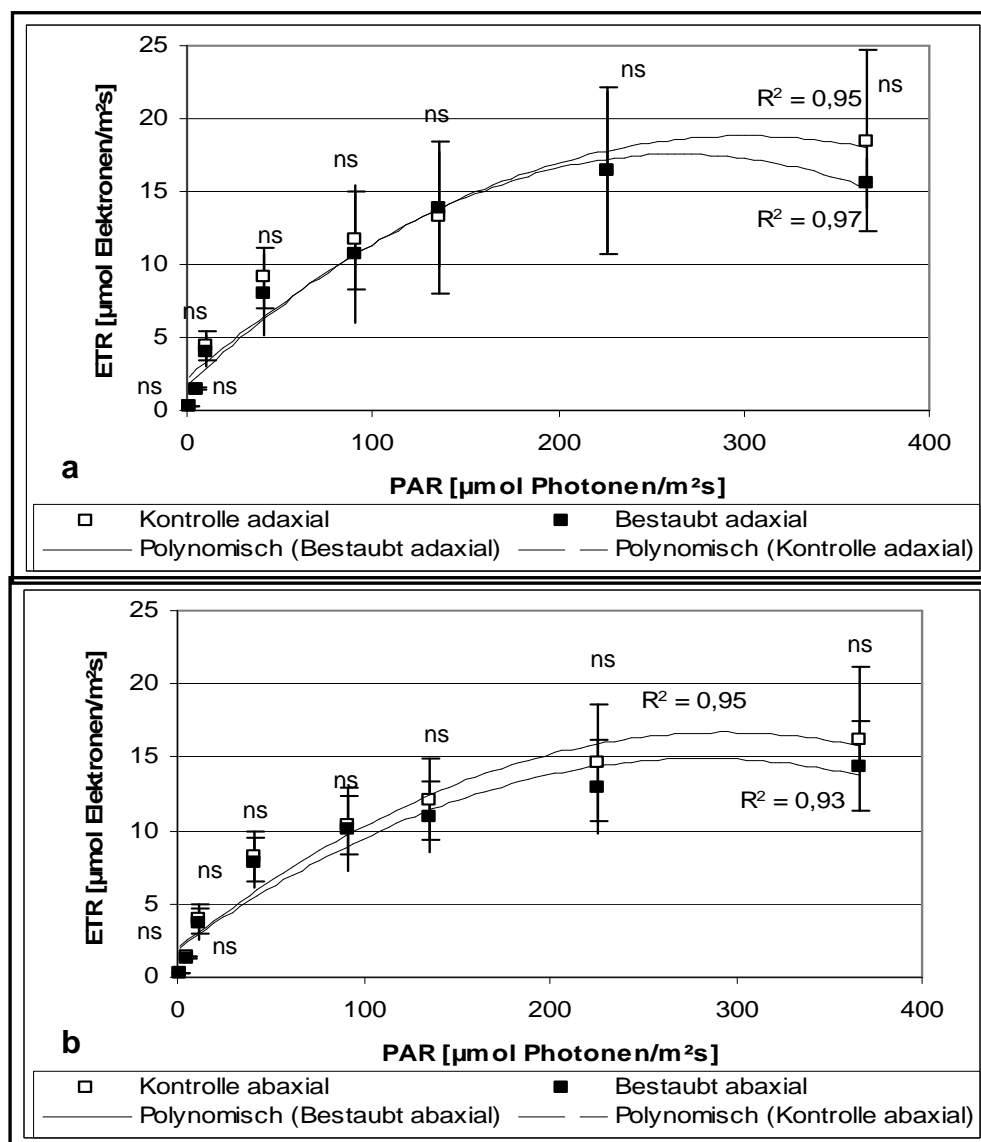


Abb. 63: (a) und (b) Elektronentransportraten [ETR] bei steigender Lichtintensität (Lichtkurven) von Blättern von *Dracaena marginata*. (a) Blattoberseiten (adaxial) bestaubt mit Mittelstaub und unbestaubter Kontrolle, (b) Blattunterseiten (abaxial) bestaubt mit Mittelstaub. Dargestellt sind Mittelwerte ($n=8$) mit SD, Trendlinie und Regressionskoeffizient. Die Unterschiede der ETR zwischen unbestaubter Kontrolle und mit Mittelstaub bestaubter Oberfläche sind nicht signifikant (ns).

Die erzielten Lichtkurven von *Dracaena marginata* (Abb.63) und *Ficus benjamini* (Abb. 65) erreichten Werte deutlich unter 20 μmol Photonen/ m^2s , wobei kaum Unterschiede zwischen Blattober- und -unterseite als auch Kontrolle und bestäubtes Blatt vorlagen (Abb.63). Der geringe Staubauftrag hatte bei solchen glatten Oberflächen kaum Möglichkeit dauerhaft haften zu bleiben und beeinträchtigte die gemessenen Elektronentransportraten nicht.

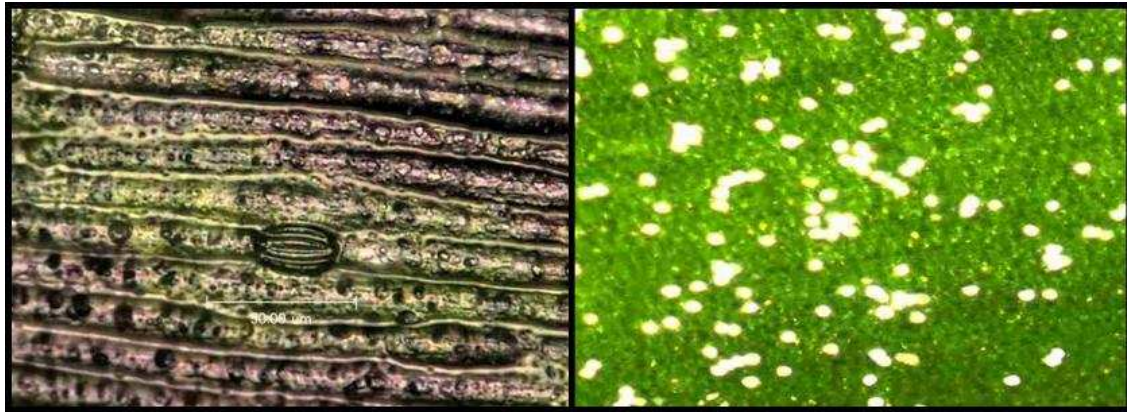


Abb. 64: Blattoberseite von *Dracaena marginata* (a) Kontrolle unbestaubt mit Stomata (b) bestäubt mit Mittelstaub

Bei *Ficus benjamini* wurde bereits bei Lichtintensitäten von um die 300 PAR eine Lichtsättigung erreicht. Die beliebte Zimmerpflanze bevorzugt helle Standorte, da jedoch der Lichtgenuss innerhalb von Räumen eher gering ist, muss sie schattentolerant sein. Die ETR folgte bei steigender Lichtintensität einer für Schattenarten typischen Kurve, die sich durch eine frühe Lichtsättigung als auch einer flachen Steigung kennzeichnen ließ (Abb. 65). Die Oberfläche von *Ficus benjamini* war vollkommen unbehaart und glatt. Auch hier hielten sich Partikel kaum, was sich in einem geringen Staubfangvermögen niederschlug.

3.3.2.2 Elektronentransportraten bei 366 PAR

Um den Einfluss von verschiedenen Stäuben auf Blattoberflächen zu bestimmen, wurden die Pflanzenoberflächen bei einer definierten hohen Lichtintensität von 366 PAR vermessen.

Die gemessenen Elektronentransportraten der unbestaubten Kontrollblätter verschiedener Pflanzenarten lagen zwischen 20 und knapp 80 $\mu\text{mol Elektronen/m}^2\text{s}$ bei einer Lichtintensität von 366 PAR. Unter natürlichen Bedingungen, d.h. einer Lichtbestrahlung von oben auf die Blattoberfläche, wurden die höchsten Elektronentransportraten erzielt, währenddessen bei Belichtung der Blattunterseite niedrigere Raten gemessen wurden (Abb.67).

Mit einem maximalen Staubauftrag der unterschiedlichen Stäube (Mittelstaub und Feinstaub) konnte bei den meisten untersuchten Arten kein signifikanter Rückgang der Elektronentransportrate beobachtet werden. Vielmehr zeigte sich, dass besonders stark bestaubte Oberflächen wie sie beispielsweise beim Runzelblättrigen Schneeball zu finden waren, die Elektronentransportrate bei einer Lichtintensität von 366 PAR nicht signifikant beeinträchtigten.

Eine Ausnahme hierbei konnte bei *Quercus rubra* festgestellt werden, hier wurden signifikante Reduktionen der ETR gemessen. *Quercus rubra* erzielte an unbestaubten Kontrollblättern die höchsten ETR, nach Bestäubung sank die ETR höchst signifikant. Die sehr glatte Oberfläche der Roteiche war nur vereinzelt mit Einfach- und Bündelhaaren versetzt (Abb. 66).

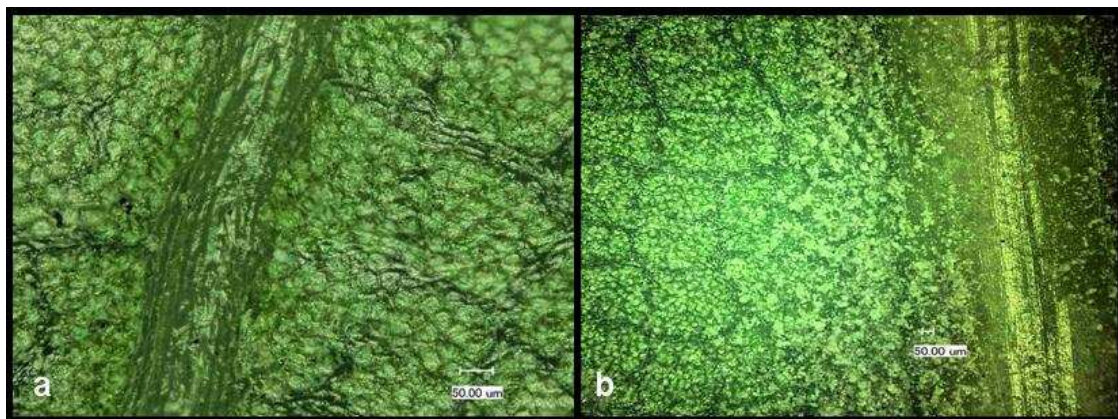


Abb. 66: Blattunterseiten von *Quercus rubra* (a) Blattnerv und Interkostalfelder (b) Blattnerv und Interkostalfelder mit Feinstaub bestaubt.

Als Staubfänger für die Feinstäube PM10 und PM2.5 jedoch sehr gut geeignet, wurden an *Quercus rubra* Mengen von $1,33 \pm 0,18 \text{ mg/cm}^2$ PM10 und $0,83 \pm 0,14 \text{ mg/cm}^2$ PM2.5 erzielt. Die Auflagerung der Stäube verringerte den Lichtgenuss und hemmte somit die ETR. Die Feinstäube lagerten sich verstärkt an den Blattadern ab, da diese erhaben über der Blattoberfläche lagen. Sie stellten Strömungshindernisse dar, an denen sich Stäube ablagern konnten (Abb. 66b).

In den Blattadern verlaufen die Leitbündel, so dass dort auf die Fläche gesehen, weniger Mesophyll vorhanden ist. Der negative Einfluss von Staubauflagerungen auf und in der Nähe von Blattadern dürfte somit weniger bedeutend sein als auf den Interkostalfeldern. Trotzdem wurde die ETR gehemmt, so dass weitere Faktoren eine Rolle spielen müssen.

Wie bereits in Kapitel 3.2.2.1 näher erläutert spielt neben der Oberflächenbeschaffenheit der Blätter zudem die phänotypische Anpassung an das Lichtklima eine Rolle. Diese erfolgt hauptsächlich während der Anlage und Ausdifferenzierung der Assimilationsorgane (LARCHER 2001). *Quercus rubra*, eine in Nordamerika heimische Laubbaumart, ist wie alle aus der Gattung *Quercus* stammenden Eichen, eine Lichtbaumart. Die hohe Lichtminderung durch Staub führte bei diesen Arten zu einem signifikanten Einfluss auf die primären Lichtreaktionen der Photosynthese.

Durch den Staubauftrag kam es zu einer Beschattung der Blattflächen, was jedoch in der Gesamtheit die primären Lichtreaktionen nicht beeinflusste, da Kompensationsprozesse innerhalb der Chloroplasten stattfinden, so dass ausreichend Photonen zur Anregung zu den Photosystemen gelangen. In den Antennenkomplexen (light harvesting complex, LHC) leiten die Antennenpigmente die Lichtenergie an die Photosysteme weiter, so dass eine eventuelle Erniedrigung des Lichtgenusses durch Bestäubung in Maßen kompensiert werden kann. Dabei erfolgt dieser Energietransfer über den sogenannten Resonanztransfer (Förstertransfer), bei dem Energie über einen strahlungsfreien Prozess weitergegeben wird (TAIZ & ZEIGER 2000). Antennenpigmente können nahezu jedes Lichtquant aufnehmen und weiterleiten, dabei kann es zu einer Degradation höherenergetischer Lichtquanten in niederenergetische Anregungsquanten zu den Reaktionszentren kommen (bis zu 50%), in denen die eigentliche Energiekonversion statt findet (TAIZ & ZEIGER 2000).

Rotes und blaues Licht wird präferiert von den Chloroplasten der oberen Schichten des Blattes absorbiert. Ist die Strahlungsintensität sehr hoch, geht überschüssige Strahlung durch Wärmedissipation verloren, während dessen grünes Licht auch in

die tieferen Schichten gelangt und dort auf nicht lichtgesättigte Chloroplasten trifft (NISHIO 2000).

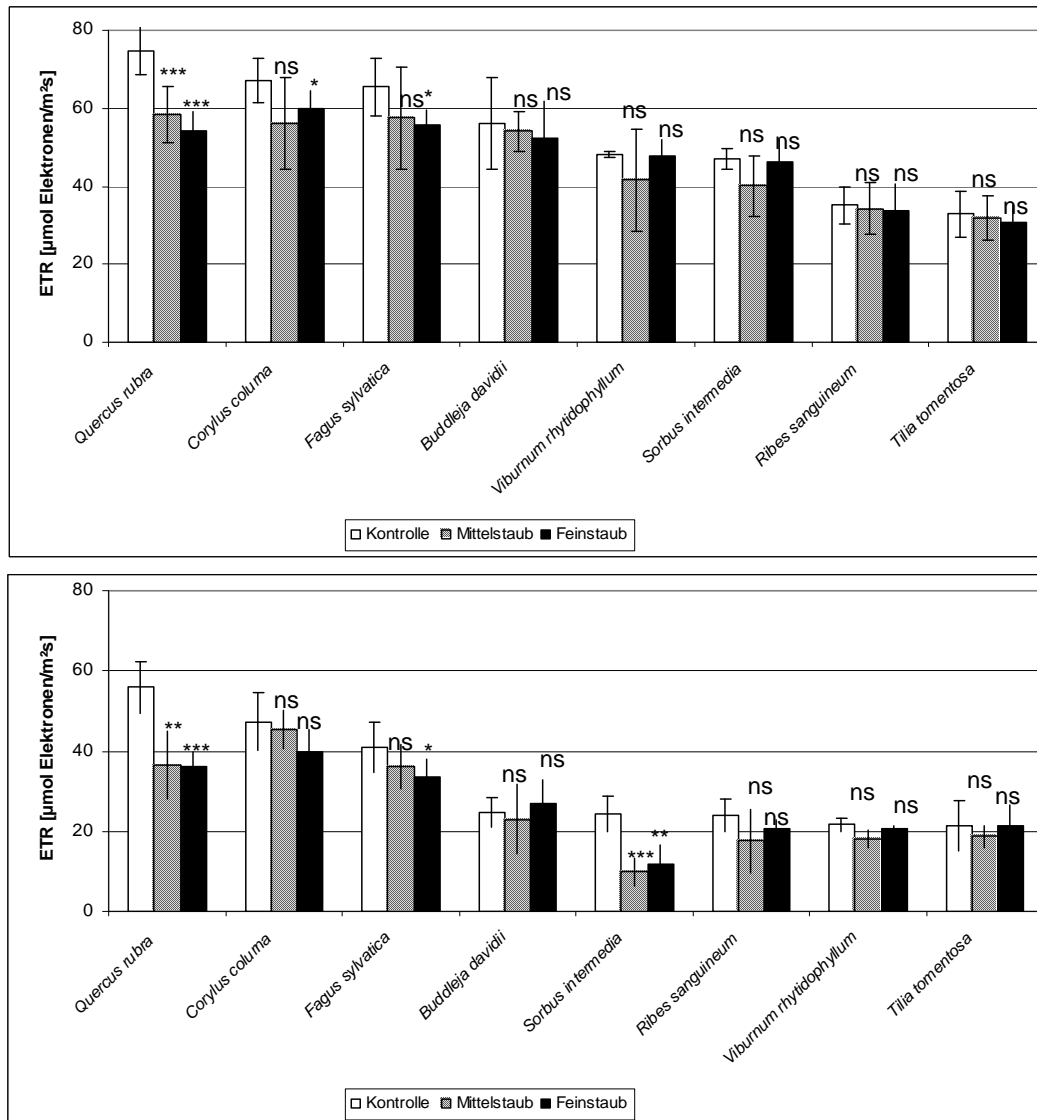


Abb. 67: Elektronentransportraten (ETR) von Blättern verschiedener Pflanzenarten nach Bestäubung mit verschiedenen Stäuben (Feinstaub und Mittelstaub) und unbestäubten Kontrollen unterschieden nach (a) Blattoberseite und (b) Blattunterseite. Dargestellt sind Mittelwerte (n=6) mit SD. Die Unterschiede der ETR zwischen unbestäubten Kontrollblättern und den jeweiligen Stäuben sind höchst signifikant (***), hoch signifikant (**), signifikant (*) und nicht signifikant (ns). Gemessen wurde bei einer Lichtintensität von 366 PAR [$\mu\text{mol Photonen}/\text{m}^2\text{s}$].

Die gewählte Lichtintensität von 366 PAR war relativ hoch, so dass bereits einige Schwachlichtpflanzen ihre Lichtsättigung erreichten. Der nicht feststellbare negative Einfluss bei dieser Lichtintensität dürfte damit erklärt werden, dass zum einen immer noch ausreichend Licht direkt zum Mesophyll durchdrang, zum anderen die Partikel sicherlich die diffuse Streuung erhöhten, so dass zusätzlich Licht zu den Chloroplasten gestrahlt wurde.

Gerade bei den Pflanzenarten mit dem höchsten Staubfangvermögen, wie bei *Viburnum rhytidophyllum*, *Ribes sanguineum* und *Tilia tomentosa* konnte die Lichtreaktion bei dieser hohen Lichtintensität nicht gehemmt werden (Abb. 62).

Die Behaarung der Blattunterseite von *Viburnum rhytidophyllum* ist ausgeprägter als bei *Viburnum tinus*. Insgesamt wurde ein Staubfangvermögen bei *Viburnum rhytidophyllum* (Blattober- und -unterseite) von 9,76 mg/cm² für PM₁₀ und 7,65 mg/cm² für PM_{2.5} maximal gemessen, wobei kein messbarer negativer Einfluss festgestellt werden konnte. Eine Reduktion der Photosynthese wird an *Viburnum tinus* bei einer Staubaufgabe von 5 g/m² beschrieben (LANGNER 2006), währenddessen bereits bei einem Staubauftrag von 1,2 g/m² ein Einfluss auf die Physiologie von *Cucumis sativa* gemessen werden konnte (HIRANO et al. 1995).

Untersuchungen an *Quercus coccifera* belegten eine Senkung der Chlorophyllfluoreszenz bei steigender Kalkstaubaufgabe (VARDAKA et al. 1995). Eine andauernde dichte Staubauflagerung kann je nach ihren physiko-chemischen Eigenschaften zu dauerhaften Einschränkungen der Photosynthese führen, was wiederum zu einer allgemeinen Vitalitätssenkung und vermindertem Zuwachs führen kann (WEN et al. 2004). Messungen an Pak-Choi (*Brassica rapa chinensis*) zur Photosynthese- und Atmungsleistung in einer BIOBOX (experimentelles Pflanzenkultursystem, dass die Wirkung der Außenluft komplett ausschließt) zeigte innerhalb von 2 Stunden nach Bestäubung mit Silikatstäuben eine Reduktion der Photosyntheseleistung von 42 % gegenüber des Ausgangswertes. Die Photosyntheseleistung nahm deutlich ab, die kleineren Partikel führten zu einer stärkeren Reduktion der Photosynthese. Eine mögliche Erklärung ist, dass Silikatstaub lipophil ist und es über Physisorption von Oberflächenwachsen der Blätter zu irreversiblen Schäden kommt (ULLRICHS 2007). Bei Untersuchungen von HOFMANN & BOMHARD 1956 in denen Flugasche auf Blätter aufgetragen wurden, konnten keine Interaktionen zwischen Staub und Blättern festgestellt werden.

Zusammenfassend konnte bei höheren Lichtintensitäten keine negative Beeinflussung der Elektronentransportrate beim überwiegenden Teil der im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Pflanzen festgestellt werden, trotz der teilweise sehr ausgeprägten Behaarung als auch dem hohem Staubauftrag (Bsp. *Viburnum rhytidophyllum*, *Buddleja davidii*). Bei einigen wenigen Arten (*Quercus rubra*, *Sorbus intermedia*) wirkte sich der Auftrag mit Feinstäuben im Bereich PM₁₀ signifikant auf die ETR aus. Insgesamt jedoch verhielten sich die eingesetzten Stäube (Mittelstaub

und Feinstäube) sehr ähnlich und beeinflussten bei hohen Lichtintensitäten die Photosynthese nicht. Die phänotypische Anpassung an das Lichtklima des Pflanzenstandortes scheint zudem mitentscheidend zu sein, wie Pflanzen mit einer Beschattung durch Staub umgehen. Da die Anpassung in Licht- und Schattenblatt hauptsächlich bei der Ausdifferenzierung der Assimilationsorgane geschieht, ist es denkbar, dass Blätter mit sehr starker und dauerhafter Verschmutzung durch Staub, Schattenblattcharakter annehmen, um somit eventuelle Nachteile auszugleichen. Kommt es nach der Ausdifferenzierung der Blätter zu starken Bestäubungen auf den Blattflächen, dürfte dies, gerade bei Lichtblättern einen negativen Einfluss auf die Photosynthese haben. Welche Auswirkungen dies auf die Gesamtassimilation innerhalb einer Vegetationsperiode hat, hängt sicherlich von der Dauer und der Mächtigkeit der Bestäubung ab. Zudem sind die chemischen Eigenschaften, z.B. die Wasserlöslichkeit und Toxizität von Bedeutung.

3.4 Schlussfolgerungen und Ausblick

Das Staubfangvermögen von Vegetation wird von vielen Parametern beeinflusst und ist sehr variabel. Die Diversität von Morphologie und Physiologie sowie die Position von Blättern, Struktur, Reife der Blätter, die stomatäre Bewegung und die Beweglichkeit beeinflussen das Bindevermögen (SMITH 1990). Die chemischen Eigenschaften des Staubes, wie z.B. dessen Löslichkeit und pH Wert als auch die Oberflächenstruktur der Partikel bestimmen mit wie viel Staub gebunden werden kann. Dabei spielen u.a. meteorologische, topographische und edaphische Faktoren wie Feuchte, Licht, Temperatur, Nährstoffgehalt als auch die spezifische Toleranz Schadstoffen gegenüber eine Rolle (DOCHINGER 1980).

Tendenziell kann festgestellt werden, dass bei nahezu allen untersuchten Arten, die Menge an maximal anhaftendem Staub unabhängig von der Kornfraktion bei behaarten Pflanzenorganen erhöht ist. Auf Blättern wurden Partikel der Größe zwischen 0,2 -150 µm festgestellt. Diese Partikel fanden sich hauptsächlich in Regionen dichter Behaarung (SMITH 1976). Eine dichte Behaarung der Blattoberflächen fördert die Staubbindefähigkeit (Tab.23). Vergleicht man den gemessenen Staubauftrag mit der Behaarung lässt sich ein direkter Zusammenhang zwischen starker Behaarung und hohen Staubmengen feststellen (Bsp. *Viburnum rhytidophyllum*), währenddessen der geringste Staubauftrag bei weitgehend unbehaarten Arten festzustellen ist (Bsp. *Clematis vitalba*). Tabelle 23 zeigt das maximale, flächenbezogene Staubfangvermögen aller untersuchten Arten nach Quantität sortiert. Dabei ist anhand farblicher Markierung der Behaarung (rot = dichte Behaarung, gelb = lockere Behaarung, grün = keine nennenswerte Behaarung) ein ganz klarer Zusammenhang zwischen dichter Behaarung und hohem Staubfangvermögen erkennbar.

Unter den untersuchten Arten kamen auch Mischtypen vor, es zeigte sich jedoch, dass die Anzahl und Dichte der Behaarung einen größeren Einfluss auf das Staubfangvermögen von Feinstaub (PM10 und PM2.5) hatte als der eigentliche Haartyp. Die unter den untersuchten Arten prägnantesten Beispiele für die Korrelation Behaarung und Staubfangvermögen ist in Abbildung 68 wiedergegeben. Arten, die dicht behaart waren (z.B. *Viburnum rhytidophyllum*), wiesen ein bis zu 10fach höheres Staubfangvermögen auf, als Arten die keine oder nur vereinzelte Behaarung haben, wie beispielsweise bei *Platanus x hispanica*.

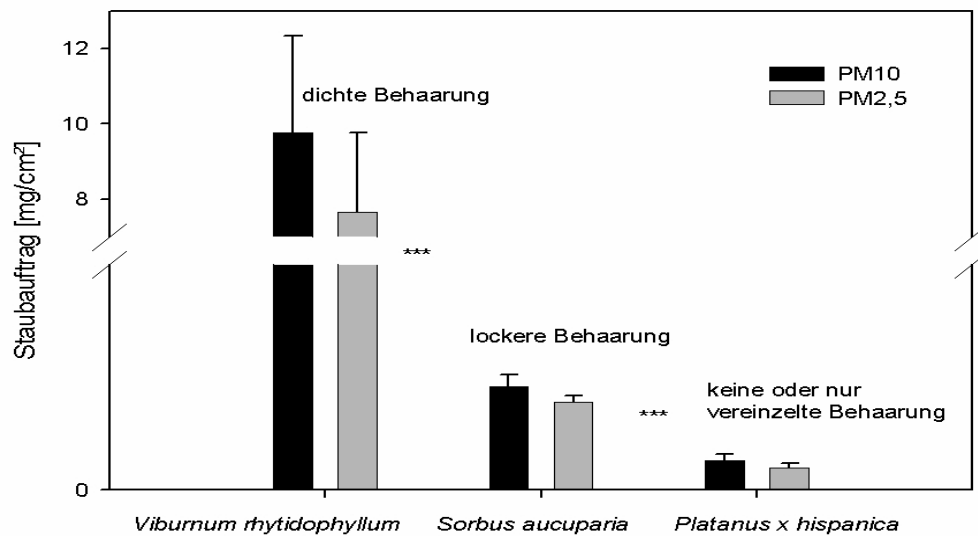


Abb.68: Feinstaubauftrag bei verschiedenen Spezies in Abhängigkeit ihrer Behaarung. Dargestellt sind Mittelwert (n=25) und SD. Die Unterschiede zwischen den Pflanzenarten mit unterschiedlicher Behaarung ist höchst signifikant (***).

Die im Rahmen dieser Arbeit verwendete Methode beruhte auf einer einmaligen Kurzbestäubung. Der bereits erwähnte Lotoseffekt spielte für diese Bestäubungsreihe keine Rolle, da für die einmalige Kurzzeitbestäubung eine durch Regenererscheinungen bedingte Selbstreinigung unerheblich ist. Unter natürlichen Bedingungen spielt die Benetzbarkeit eine große Rolle.

Durch Untersuchungen von THÖNNESSEN (2002,2006) ist bekannt, dass Pflanzen sehr spezifisch Staub entweder akkumulieren oder Staub vermeiden.

Staubakkumulierer lagern während der ganzen Vegetationszeit Staub auf ihren Oberflächen ab, während dessen Staubvermeider durch Regenereignisse als auch Windbewegungen nahezu vollständig gereinigt werden und auch gegen Ende der Vegetationszeit reine Oberflächen aufweisen. *Parthenocissus tricuspidata* weist eine stark verunreinigte Oberfläche am Ende der Vegetationszeit auf, so dass sie zu den Staubakkumulierern zählt, währenddessen beispielsweise *Platanus x hispanica* zu den Staubvermeidern zählt, die durch Selbstreinigung bei Regen ihre Blattflächen sauber hält. Welche der beiden Strategien die erfolgreichere ist, wird noch diskutiert (THÖNNESSEN 2006).

Tab.23: Auflistung aller untersuchten Pflanzenarten mit Angaben zum Staubfangvermögen von Feinstaub (PM10) und (PM2.5). (n=25) in mg bezogen auf die Blattfläche [cm²] mit Standardabweichung [SD] mit Angaben zur Behaarung. Die farbig gehaltene Spalte „Haare“ teilt alle untersuchten Arten nach ihrer Behaarung ein, dabei entspricht ■ einer dichten Behaarung, die in den meisten Fällen auf der Blattunterseite dichter als auf der Blattoberseite ist, ■ entspricht einer lockeren Behaarung, ■ keine nennenswerte Behaarung, höchstens wenige einzelne Haare

Wissenschaftlicher Name	PM10	SD	PM2.5	SD	Haare	Anmerkung
<i>Viburnum rhytidophyllum</i>	9,76	2,57	7,65	2,12	■	Bündelhaare US dicht, OS locker, 20-40 Haare gebündelt, (1)
<i>Lagurus ovatus*</i>	3,91	0,53	1,5	0,2	■	OS + US dicht, samartig (8)
<i>Ribes sanguineum</i>	3,57	0,47	3,18	0,62	■	Einfachhaare OS u US dicht, Köpfchenhaare (Drüsenhaare) (6)
<i>Sorbus intermedia</i>	2,31	0,41	1,01	0,21	■	Einfachhaare US dicht, OS locker (1)
<i>Phlomis fruticosa</i>	2,13	0,68	1,37	0,38	■	Bündelhaare OS u US dicht (5)
<i>Althaea officinalis</i>	1,93	0,64	1,76	0,43	■	Bündel- u Köpfchenhaare OS u US dicht (9)
<i>Corylus colurna</i>	1,86	0,17	0,67	0,07	■	Einfach- u Köpfchenhaare, OS u US locker (1)
<i>Festuca cinerea*</i>	1,85	0,3	0,29	0,06	■	OS dicht u kurze Haare, US kahl (2)
<i>Tilia tomentosa</i>	1,6	0,2	1,21	0,13	■	Schildhaare US dicht, OS vereinzelt (1)
<i>Holcus lanatus</i>	1,49	0,21	1,24	0,35	■	OS u US weich u samartig behaart, schwach ausgeprägte Riefen (2)
<i>Buddleja davidii</i>	1,41	0,36	1,12	0,29	■	Bündelhaare, OS locker, US dicht (1)
<i>Arrhenatherum elatius*</i>	1,37	0,31	0,75	0,18	■	OS leicht behaart oder kahl, schwach gerieft (2)
<i>Hordeum murinum*</i>	1,34	0,14	0,49	0,11	■	kurz behaart oder kahl (2)
<i>Quercus rubra</i>	1,33	0,18	0,83	0,14	■	Einfach- u Bündelhaare OS u US locker (1)
<i>Salvia officinalis</i>	1,31	0,17	0,72	0,11	■	Einfach- u Köpfchenhaare, OS u US dicht (9)
<i>Weigelia middendorffiana</i>	1,29	0,12	1,12	0,14	■	OS u US dichte Behaarung (4)
<i>Potentilla anserina</i>	1,2	0,26	0,12	0,03	■	OS locker, US dicht seidenhaarig (3)
<i>Geranium x magnificum</i>	1,15	0,32	1,1	0,23	■	Einfachhaare OS u US dicht (4)
<i>Corylus avellana</i>	1,12	0,27	0,76	0,15	■	Einfach- u Köpfchenhaare OS u US locker (1)
<i>Viburnum lantana</i>	1	0,27	0,41	0,13	■	Einfach- u Köpfchenhaare OS u US locker, Bündelhaare US dicht (5)
<i>Hieracium pilosella</i>	0,99	0,09	0,11	0,02	■	Einfachhaare, lang auf OS (4)
<i>Alchemilla mollis</i>	0,94	0,27	0,72	0,17	■	Einfachhaare OS u US dicht (4)
<i>Bromus erectus*</i>	0,7	0,13	0,49	0,15	■	schwach gerieft und behaart, an Blatträndern kammartig bewimpert (2)
<i>Rhus typhina</i>	0,61	0,19	0,57	0,11	■	Einzel- u Köpfchenhaare OS u US locker (1)
<i>Ficus benjamina</i>	0,58	0,03	0,33	0,03	■	keine nennenswerte Behaarung (4)
<i>Nephrolepis exaltata</i>	0,57	0,06	0,39	0,05	■	keine nennenswerte Behaarung (4)
<i>Plantago major</i>	0,57	0,06	0,14	0,03	■	keine nennenswerte Behaarung (4)

Quellenangaben: (1) WESTERKAMP & DEMMELMEYER 1997, (2) CONERT 2000, (3) DÜLL & KUTZELNIGG 1994, (4) Flohr, eigene Beobachtung, (5) LABER 1954, (6) FROHNE & PFÄNDER 1997, (7) HUMMEL & STAESCHKE 1962, (8) HUBBART 1985, (9) GASSNER 1973; (*) FUNKE 2008

Fortsetzung Tab. 23

Wissenschaftlicher Name	PM10	SD	PM2.5	SD	Haare	Anmerkung
<i>Poa annua</i> *	0,57	0,19	0,34	0,14		keine nennenswerte Behaarung (2)
<i>Lamium album</i>	0,55	0,09	0,04	0,01		Einfachhaare OS u US dicht (4)
<i>Phleum pratense</i> *	0,53	0,19	0,5	0,22		keine nennenswerte Behaarung (2)
<i>Fallopia japonica</i>	0,52	0,11	0,46	0,07		keine nennenswerte Behaarung (4)
<i>Lavandula angustifolia</i>	0,49	0,11	0,29	0,09		Bündelhaare, OS u US dicht (4)
<i>Deschampsia cespitosa</i>	0,48	0,07	0,07	0,01		keine nennenswerte Behaarung (2)
<i>Dracaena marginata</i>	0,48	0,05	0,22	0,04		keine nennenswerte Behaarung (4)
<i>Agrostis stolonifera</i> *	0,46	0,15	0,59	0,17		keine nennenswerte Behaarung (2)
<i>Sorbus aucuparia</i>	0,46	0,05	0,39	0,03		Einfachhaare, OS unbehaart u US locker (1)
<i>Dracaena fragans</i>	0,45	0,02	0,16	0,02		keine nennenswerte Behaarung (4)
<i>Solidago gigantea</i>	0,43	0,12	0,39	0,12		keine nennenswerte Behaarung (4)
<i>Galium aparine</i>	0,42	0,1	0,12	0,04		Kletthaare, locker auf OS u US (3)
<i>Prunus laurocerasus</i>	0,42	0,06	0,38	0,04		keine nennenswerte Behaarung (4)
<i>Fagus sylvatica</i>	0,41	0,05	0,17	0,02		Einfachhaare OS u US locker (1)
<i>Pelargonium peltatum</i>	0,41	0,08	0,31	0,07		Köpfchenhaare (Drüsenhaare) OS u US dicht (4)
<i>Calathea rufibarba</i>	0,4	0,03	0,23	0,03		Einfachhaare, OS locker auf Nerven, US dicht (4)
<i>Petunia x hybrida</i>	0,37	0,09	0,34	0,08		Köpfchenhaare (Drüsenhaare), OS u US dicht (4)
<i>Rhododendron catawbiense</i>	0,37	0,08	0,3	0,06		keine nennenswerte Behaarung (4)
<i>Berberis vulgaris</i>	0,35	0,06	0,04	0,02		keine nennenswerte Behaarung, wenige Einzelhaare (7)
<i>Hedera helix</i>	0,35	0,04	0,26	0,04		Bündelhaare, vereinzelt (1)
<i>Lolium multiflorum</i> *	0,35	0,09	0,27	0,08		keine nennenswerte Behaarung (2)
<i>Setaria glauca</i>	0,35	0,12	0,23	0,06		keine nennenswerte Behaarung, einzelne Haare möglich (2)
<i>Urtica dioica</i>	0,35	0,03	0,11	0,03		Einfach- u Brennhaare OS u US dicht (4)
<i>Artemisia vulgaris</i>	0,33	0,04	0,08	0,02		US stark behaart, filzig, OS unbehaart (3)
<i>Dactylis glomerata</i>	0,33	0,07	0,27	0,08		keine Behaarung, oder sehr schwach behaart (2)
<i>Filipendula ulmaria</i>	0,33	0,08	0,03	0,02		US weiß beflaumt, gefiederte und stark geäderte Blätter (3)
<i>Bromus inermis</i> *	0,32	0,06	0,36	0,03		keine Behaarung (2)
<i>Ajania pacifica</i>	0,3	0,07	0,22	0,03		Einzelhaare, OS u US dicht, anliegend an Blatt (4)

Quellenangaben: (1) WESTERKAMP & DEMMELMEYER 1997, (2) CONERT 2000, (3) DÖLL & KUTZELNIGG 1994, (4) Flohr, eigene Beobachtung, (5) LABER 1954, (6) FROHNE & PRÄNDER 1997, (7) HUMMEL & STAESCHKE 1985, (8) HUBBART 1962, (9) GASSNER 1973; (*) FUNKE 2008

Fortsetzung Tab. 23

Wissenschaftlicher Name	PM10	SD	PM2.5	SD	Haare	Anmerkung
<i>Chamaedorea elegans</i>	0,3	0,02	0,25	0,02		keine nennenswerte Behaarung (4)
<i>Lolium perenne</i> *	0,3	0,06	0,26	0,09		keine nennenswerte Behaarung, stark gerieft (2)
<i>Humulus lupulus</i>	0,28	0,13	0,27	0,09		Hakenhaare, OS u US locker (3)
<i>Sambucus nigra</i>	0,28	0,06	0,25	0,07		keine nennenswerte Behaarung (4)
<i>Carpinus betulus</i>	0,27	0,01	0,26	0,04		Einfach- u Köpfchenhaare locker (1)
<i>Convolvulus arvensis</i>	0,26	0,05	0,17	0,03		keine nennenswerte Behaarung (4)
<i>Parthenocissus quinquefolia</i>	0,26	0,04	0,26	0,01		Einfachhaare, OS u US locker (1)
<i>Pyrus pyrastr</i>	0,26	0,04	0,05	0,01		keine nennenswerte Behaarung, nur kurz nach Austrieb (3)
<i>Fraxinus excelsior</i>	0,25	0,04	0,22	0,06		Köpfchenhaare, OS u US locker (1)
<i>Aesculus hippocastanum</i>	0,24	0,09	0,23	0,06		keine nennenswerte Behaarung (4)
<i>Bryonia dioica</i>	0,22	0,07	0,22	0,06		Einfachhaare, OS u US locker (4)
<i>Calystegia sepium</i>	0,22	0,05	0,21	0,04		keine nennenswerte Behaarung (4)
<i>Anthoxanthum odoratum</i>	0,2	0,04	0,2	0,04		keine nennenswerte Behaarung, oder vereinzelt (2)
<i>Acer pseudoplatanus</i>	0,19	0,07	0,19	0,04		keine nennenswerte Behaarung (1)
<i>Quercus robur</i>	0,19	0,07	0,17	0,04		Einfach/ Köpfchen/ Bündelhaare, OS u US locker (1)
<i>Briza maxima</i>	0,19	0,04	0,13	0,03		keine nennenswerte Behaarung (2)
<i>Tanacetum vulgare</i>	0,18	0,03	0,21	0,04		Einfachhaare OS u US locker (4)
<i>Prunus spinosa</i>	0,15	0,03	0,03	0,01		keine nennenswerte Behaarung (4)
<i>Philadelphus coronarius</i>	0,15	0,03	0,12	0,02		US Nerven behaart, schwache Achselbärte
<i>Parthenocissus tricuspidata</i>	0,13	0,05	0,12	0,03		lockere Einfachhaare (1)
<i>Platanus x hispanica</i>	0,13	0,03	0,1	0,02		Etagenhaare, wenige im juvenilen Stadium (3)
<i>Juglans regia</i>	0,12	0,03	0,11	0,03		keine nennenswerte Behaarung, in Nervenwinkeln wenig behaart (4)
<i>Taraxacum officinalis</i>	0,09	0,02	0,03	0,01		keine nennenswerte Behaarung (4)
<i>Euonymus europaeus</i>	0,09	0,02	0,1	0,02		keine nennenswerte Behaarung (4)
<i>Robinia pseudoacacia</i>	0,08	0,02	0,09	0,01		Einfachhaare einzeln OS u US (1)
<i>Betula pendula</i>	0,08	0,01	0,06	0,01		Einzelne Einfachhaare OS, Köpfchenhaare einzeln OS u US (1)
<i>Clematis vitalba</i>	0,05	0,01	0,05	0,01		Einfachhaare auf Hauptnerven US (4)

Quellenangaben: (1) WESTERKAMP & DEMMELMEYER 1997, (2) CONERT 2000, (3) DÜLL & KUTZELNIGG 1994, (4) Flohr, eigene Beobachtung, (5) LABER 1954, (6) FROHNE & PFÄNDER 1997, (7) HUMMEL & STAESCHKE 1962, (8) HUBBART 1985, (9) GASSNER 1973; (*) FUNKE 2008

Eventuell schädigen die mitunter mächtigen Staubschichten bei den Staubakkumulierern durch Abschattung die Photosyntheseleistung, so dass möglicherweise die Vermeider durch die Selbstreinigung zum einen keine Schädigung durch den Staubauftrag zu erwarten haben und zum anderen ein eventuell höheres Staubfangvermögen aufweisen. Unter Umständen ist die Gesamtfilterleistung von Selbstreinigern höher als die der Akkumulierer. Nach Niederschlagsereignissen können diese neue Partikel aufnehmen und somit im Verlauf der Vegetationsperiode erneut Staub binden (THÖNNESSEN 2006).

Durch Regenereignisse gelangen die wasserlöslichen Bestandteile des Staubauftrags in das Regenwasser und erreichen auf diesem Weg den Boden, wo sie, je nach chemischer Zusammensetzung, durchaus eine düngende Wirkung haben können. Besonders Staubpartikel größer als 1 µm lassen sich leicht mit Regenwasser abwaschen (GÜNTHER & WORTHMANN 1966). Durch Regenfälle kommt es zur erheblichen Abwaschung des Staubauftrages. Messungen an *Rhododendron catawbiense* ergaben für einen Zeitraum von drei Wochen im Winter einen Staubauftrag von 0,25 mg/cm² und 0,10 mg/cm² im Sommer (STEUBING & KLEE 1970). Das maximale Staubfangvermögen für PM₁₀, was durch einmalige Bestäubung erzielt wurde, lag mit $0,37 \pm 0,08$ mg/cm² 48 % über den von STEUBING & KLEE gemessenen Werten. Von der Tendenz her stimmen die Ergebnisse überein, dass *Rhododendron catawbiense* insgesamt ein niedriges Staubfangvermögen aufweist. Dennoch ist der Beitrag nicht zu unterschätzen, da er als immergrüne Art ganzjährig Partikel binden kann.

Im Zuge der natürlichen Seneszenz gelangt das Laub von Staubakkumulierern auf den Boden. In direkter Straßennähe kann das Laub zurück auf die Straßen geblasen und durch vorbeifahrende Autos zermahlen werden, sodass der akkumulierte Staub wieder freigesetzt würde. Um dies zu verhindern empfiehlt sich eine bodennahe Bepflanzung mit einer Kraut- und Strauchschicht, die einen luftberuhigten Raum schafft, in dem die Blätter abfallen und verrotten können, ohne ihre Staublast in die Atmosphäre zurückzugeben (PFANZ et al. 2006).

Die beiden aus der Literatur bekannten Arten *Parthenocissus tricuspidata* als auch *Platanus x hispanica* weisen unterschiedliche Strategien auf, mit Staubauflagerungen umzugehen (THÖNNESSEN 2006). Somit müsste beim Typ des Akkumulierers *Parthenocissus tricuspidata* deutlich mehr Staub feststellbar sein, als auf *Platanus x hispanica*, die zu den Staubmeidern zählt. Das maximale, flächenbezogene

Staubfangvermögen von *Parthenocissus tricuspidata* als auch *Platanus x hispanica* lag bei beiden um $0,13 \pm 0,03 \text{ mg/cm}^2$ PM10 und PM2.5, sodass im Rahmen der einmaligen Bestäubung nur ein sehr geringes Staubfangvermögen erzielt werden konnte. Unter natürlichen Bedingungen müssten in Zukunft Untersuchungen erfolgen, in denen geklärt werden muss, welche der beiden innerhalb einer Vegetationsperiode die größte Filterleistung mit ihren unterschiedlichen Strategien erzielt. Die Blattflächen der beiden Arten weisen nur wenige und vereinzelte Einfach-/Etagenhaare auf (Abb.18). Aufgrund der bisherigen Erkenntnisse ist das geringe Staubfangvermögen mit der fehlenden bis nur mäßig vorhandenen Blattbehaarung zu erklären.

Wie sich die Staubauflagerung innerhalb einer Vegetationsperiode verändert, war nicht Gegenstand dieser Arbeit.

In Zukunft sollten Bestäubungsversuche mit der vorgestellten Methode im Feldversuch weitergeführt werden. Interessant wäre, wie und ob sich das maximale Staubfangvermögen während einer Vegetationsperiode verändert. Dabei sollten die im Rahmen dieser Arbeit genannten Spezies mit hohem Staubfangvermögen weiterhin untersucht werden. Denkbar wäre, dass bei Arten wie *Viburnum rhytidophyllum*, durch Regenerscheinungen die Feinstäube wieder entfernt werden und sich somit erneut Staub auflagern könnte. Dies würde ein enorm höheres Staubfangvermögen bedingen, als es im Rahmen dieser Kurzzeitexperimente feststellbar war.

Allgemein ist es schwer zu sagen, inwieweit Partikel sich abwaschen lassen, die schon länger auf der Oberfläche haften. Möglicherweise haben chemische Reaktionen mit der Oberfläche stattgefunden, die eine Abwaschbarkeit vermindern, die Absorption und ihre Löslichkeit verändern (WEDDING 1977).

3.4.1 Modell zum optimalen Einsatz von Straßenbegleitgrün

Mit Hilfe von geeignetem Straßenbegleitgrün können wichtige Reaktionsräume entstehen, die dazu beitragen können, Stäube, insbesondere die gesundheits-schädigenden Feinstäube ($<10\text{ }\mu\text{m}$ im Durchmesser) aus der Luft zu filtern. Solche Schutzanpflanzungen müssen in direkter Nähe zum Emittenten, d.h. am Straßenrand respektive dem Mittelstreifen erfolgen. Um ein Optimum an Feinstaubfangvermögen durch Pflanzen zu gewährleisten muss zum einen ein Netzwerk dreidimensionaler Sprosse und Blätter geschaffen werden, welches windberuhigte Räume schafft, in denen Staub sedimentieren kann (PFANZ & FLOHR 2007) und zum anderen direkt an den Pflanzen Partikel impaktieren können. Dabei muss eine gute Durchströmbarkeit der Anpflanzungen gewährleistet sein (BERNATZKY 1973, WENTZEL 1968).

Ein mittlerer LAI (Blattflächenindex) von 5-6 wird für eine optimierte Partikelfilterung empfohlen, da somit eine gute Durchströmbarkeit in jedem Fall gewährleistet ist, die Voraussetzung für ein gutes Fangvermögen ist.

Vegetation verursacht eine Modifikation des Strömungsfeldes und beeinflusst somit das Ablagerungsverhalten von Partikeln. Die Auswirkung auf die Partikelkonzentration durch Bepflanzung einer Hecken und Baumstruktur im Stadtgarten Essen wurde mittels Simulationsmodellen von BRUSE (2005) durchgeführt. In den Heckenstrukturen wurden Partikel deponiert und im Lee der Hecke zeigten sich geringere Konzentrationen, dennoch hält der Autor die Senkung insgesamt für eher gering und lediglich durch die Modifikation des Strömungsfeldes bedingt. Insgesamt gesehen sei der Beitrag zur Luftreinigung von Vegetation als sehr gering einzuschätzen (unter 1%) (BRUSE 2003).

Im Lee von Begrünungseinheiten senkt sich die Windgeschwindigkeit um bis zu 70%, sodass hier Partikeldeposition stattfinden kann, ebenso wie an den Seiten der Einheiten, da hier durch verstärkte Turbulenzen ebenfalls Partikel abgeschieden werden können (SWAAGSTRA & DE KLUIVER 2007). Eine ausreichend hohe Porosität der Strukturen führt zu einer maximalen Konzentrationsminderung von PM₁₀ um 20% im Lee der Bepflanzung.

Einen deutlichen Filtereffekt zeigen Modellberechnungen zu folge Porositäten von Vegetation von etwa 90% besonders für die feinsten Partikel, wobei bereits zwischen 50 und 70% ein positiver Effekt feststellbar ist (WESSELING et al. 2004). Auch im

Winter tragen Bäume zu einer Windberuhigung bei, eine Staubfilterung durch Sprossstrukturen ist ebenfalls gegeben. Eine Optimierung der Filterung wird durch Einsatz von immergrünen und winterlaubtragenden Arten erzielt. Für die Verwendung direkt in Emittentennähe (Straßenrand, Mittelstreifen) sind bodendeckende Bepflanzungen bedeutender, da sie die vom Verkehr freigesetzten Schadstoffe unmittelbar aufnehmen können (u.a. durch Impaktion), als auch das im Herbst anfallende mit Feinstaub beladene Laub abfangen können. Dieses kann dort zwischen den Pflanzen zu Boden sinken und verstoffwechselt werden, ohne dass die Blätter vom Straßenverkehr zermahlen und der Staub in die Atmosphäre zurück gelangen kann. Einschätzungen von LANGNER (2005) zu folge können gerade winddurchlässige Baumreihen in direkter Fahrbahnnähe eine beachtliche Filterleistung erzielen, da die Deposition von Verkehrsemissionen bereits in kurzer Entfernung exponentiell abnimmt.

Straßenbegleitgrün und allgemein Vegetation wirkt sich positiv auf das Mikroklima aus (Abb.69). So konnten deutlich niedrigere Temperaturen, eine erhöhte Luftfeuchte als auch eine messbare Windberuhigung in ungemähten Gras- und Krautschichten im Gegensatz zu gemähten Flächen und einem Asphaltbereich im Mittelstreifenbereich festgestellt werden (PFANZ et al. 2006).

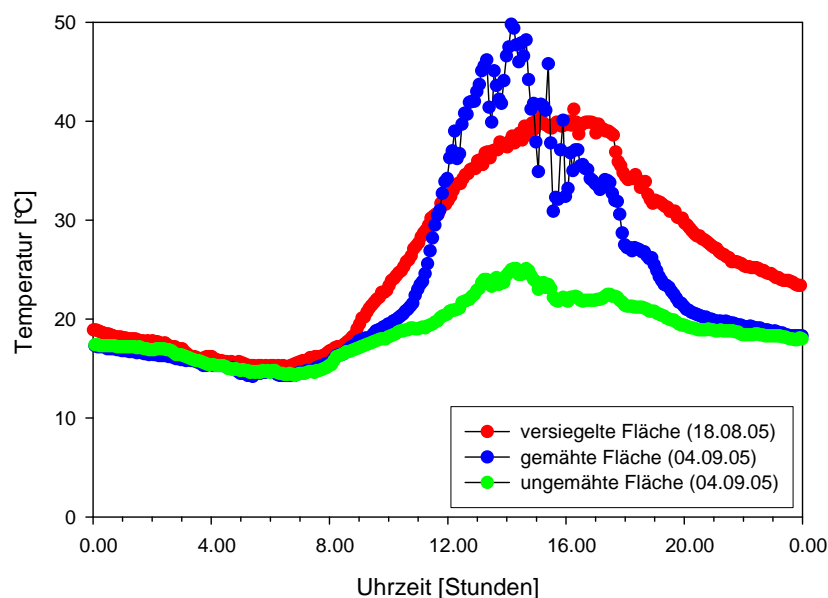


Abb. 69 : Tagesgang der Temperatur bei verschiedenen Beständen direkt über dem Boden (in 1 cm Höhe) an einem sonnigen Tag (PFANZ et al. 2006)

All diese Parameter begünstigen die Staubablagerung in diesem Bereich durch Begleitgrün.

Pflanzen weisen eine deutliche Multifunktionalität auf. Neben den bereits erwähnten positiven Eigenschaften sorgen sie zudem durch ihren Gasaustausch und die Photosynthese dafür, dass lebensnotwendiger Sauerstoff produziert und Kohlendioxid reduziert wird. Gerade in Städten erfährt man durch Vegetation eine Wohlfahrtswirkung, da sie Schatten spendet und somit die Luft besonders in heißen Sommern angenehm kühlt. Das menschliche Wohlbefinden wird durch die Formenvielfalt, Blüten-, Farben- und Duftdiversität gesteigert.

Pflanzen leisten einen nicht unerheblichen Beitrag auch Schadgase aus der Luft zu filtern. So können bis zu 20 % SO_2 und O_3 von dichten Baumbeständen aufgenommen werden (BECKETT et al. 1998), für NO_2 wurden 10 % ermittelt (WESSELING et al. 2004), und Ammoniak kann zwischen 3-13 % aus der Luft aufgenommen werden (SUTTON et al. 2004).

Vegetation in der Stadt senkt die Lufttemperatur und erhöht die Luftfeuchtigkeit. Ein großer Teil der ankommenden Energie wird bereits im Blattwerk absorbiert und führt dazu, dass direkt unter den Kronen eine um bis zu 3°C kühlere Temperatur messbar wird (LEH 1993).

Eine Lärminderung und Schalldämpfung durch Vegetation kann zwischen 1 und 10 dB betragen, wobei die höheren Frequenzbereiche stärker gedämpft werden als die tiefen Töne (LEH 1993).

Jährlich gelangen schätzungsweise 30-270 Megatonnen Aerosole aus biogenen Quellen in die Atmosphäre (IPCC 2001). Pflanzen können zudem schädliche Substanzen emittieren, so gehören sie zu den Hauptemittenten für flüchtige organische Verbindungen (VOCs). Gestresste Pflanzen, z.B. in Städten durch erhöhte Ozon- und Kohlendioxidbelastung, emittieren verstärkt VOCs, so dass geraten wird, bei Bepflanzungsempfehlungen auch auf die VOC Produktion der Pflanzen zu achten (CORCHNOY et al. 1992).

Bei Bepflanzungsempfehlungen müssen Toleranzen gegenüber bestimmten urbanen Schadstoffen beachtet werden. Die Pflanzen müssen gegenüber Schadstoffen wie Ozon, Schwefeldioxid, NO_2 , Streusalz und Bodenverdichtung relativ unempfindlich sein. Relativ stickoxidtolerant sind unter anderem folgende Arten: *Euonymus europaea*, *Carpinus betulus*, *Corylus avellana*, *Fagus sylvatica*, *Quercus robur*, *Rhododendron spec.*, *Sambucus nigra*. Eine gute Salzverträglichkeit weisen die

Arten *Euonymus europaea*, *Carpinus betulus*, *Corylus avellana*, *Crataegus monogyna*, *Acer campestre* und *Amelanchier lamarckii* auf.

Für Autobahnen werden begrünte Lärmschutzwände empfohlen, die in der Regel eine Höhe von 1,5 m aufweisen sollten, da Untersuchungen gezeigt haben, dass eine Konzentrationsminderung von fast 85 % direkt hinter der Wand erzielt werden können (IASP 2007).

Bei all den genannten Vorteilen ist jedoch darauf zu achten, dass die angepflanzten Bäume und Sträucher gut durchströmbar sind. Gerade in engen Straßenschluchten in Kombination mit Alleebäumen kann es ansonsten zu einer Schadstoffakkumulation kommen, da ein Austausch der Luftmassen nicht gewährleistet ist (Abb. 70).

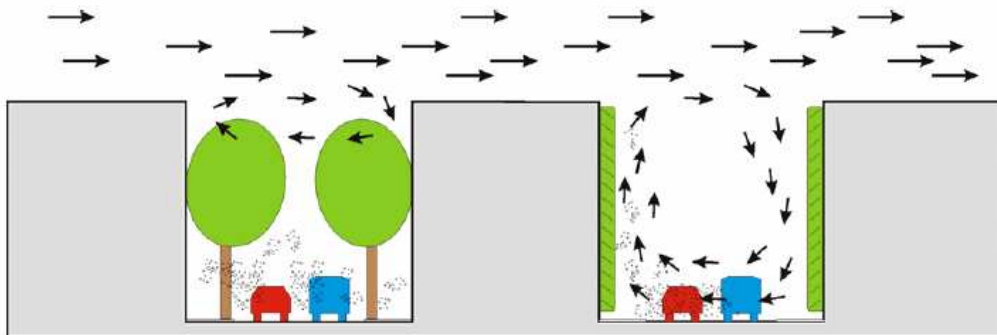


Abb. 70: Verschiedene Austauschszenarien von Luftmassen bei unterschiedlichen Bepflanzungen. Links: dichtkronige Allee, recht: Fassadenbegrünung (BRUSE, 2003)

Unter Beachtung der bereits genannten Maßnahmen wird im Folgenden auf Grundlage der untersuchten Arten ein Modell einer optimierten Straßenbegleitbegrünung anhand des maximalen flächenbezogenen Staubfangvermögens erstellt.

Unter den im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Bäumen erweisen sich als besonders geeignet *Corylus colurna*, *Tilia tomentosa*, *Quercus rubra* und *Sorbus intermedia*. Je nach Standort empfiehlt sich eine angrenzende Strauchschicht aus *Viburnum rhytidophyllum*, *Buddleja davidii* oder auch *Phlomis fruticosa*. Sicherlich von Vorteil ist zudem, dass der Runzelblättrige Schneeball als auch das Strauch-Brandkraut immergrün sind, und somit ganzjährig mit ihren behaarten Blattoberflächen Feinstäube filtern und windberuhigte Reaktionsräume schaffen können. An den Stämmen der Bäume können zudem Kletterpflanzen wie z.B. *Hedera helix*

empor ranken, der wiederum ganzjährig zur Feinstaubreduktion beitragen kann. Als Bodendecker eignen sich besonders *Althaea officinalis*, *Geranium x magnificum* als auch *Alchemilla mollis*. Unter den Gräsern weisen *Lagurus ovatus*, *Festuca cinerea*, *Holcus lanatus*, *Arrhenatherum elatius* und *Hordeum murinum* ein gutes Feinstaubfangvermögen auf.

Bei den Empfehlungen ist auf die jeweiligen Ansprüche der Pflanzen zu achten, u.a. deren Bodenansprüche. Die unter Laborbedingungen erzielten Feinstaubfangwerte ergeben eine gute Basis, aufgrund derer man je nach Einsatzgebiet, die optimalen Bedingungen schaffen kann, um mit Hilfe von Vegetation Feinstaub zu binden.

Einige Forscher nehmen eine abnehmende Staubfilterleistung in der Reihe „Bäume-Sträucher-Gräser“ aufgrund der abnehmenden Blattoberfläche an (IASP 2007). Die Ergebnisse aus dieser Arbeit spiegeln ein anderes Ergebnis wieder. Vielmehr scheint neben der Vegetationsform die Behaarung von weitaus größerer Bedeutung zu sein, was die sehr hohen erzielten Werte für das maximale Staubfangvermögen bezogen auf die Fläche gerade bei Gräsern, z.B. bei *Lagurus ovatus* belegen.

Frühere Arbeiten beschäftigten sich bereits mit der Filterwirkung von Vegetation, jedoch wurde zunächst der Gesamtstaubauftrag beschrieben, ohne Unterteilung in die Kornfraktionen.

Geeignete Gehölze zur Abschirmung von Staub seien u.a. *Acer pseudoplatanus*, *Acer platanoides*, *Fagus sylvatica*, *Fraxinus excelsior*, *Platanus x hispanica*, *Betula pendula*, *Robinia pseudoacacia* als auch *Syringa vulgaris* (RANFT 1982). Bei den Untersuchungen von RANFT ging es primär um den Staubschutz durch Pflanzen als natürliches Hindernis im Windfeld und sekundär um die Auskämmwirkung des Staubes. Die genannten Arten zeigen jedoch im Rahmen dieser Arbeit die geringsten Staubaufträge (Tab.22). Es zeigt sich, dass neben der geeigneten Blattoberfläche (Haare, Rauigkeit), auch die Morphologie der Bäume (Krone, Habitus) eine große Rolle spielen.

Für *Tilia platyphyllos* wurden Immissionspartikel auf Blattspreiten auf einer Fläche von 1 m² bis zu 2,23 g gemessen (PASKOVA 1989). Dabei wurde nicht näher nach der Partikelgröße differenziert und es nicht ersichtlich wie sich die Blattfläche zusammensetzt. Es ist entscheidend, ob die Blattoberfläche einfach, oder, wie in dieser Arbeit verwendet, beide Blattseiten als Staubfangfläche gewertet werden. Für eine andere Lindenart, *Tilia tomentosa*, wurde ein Staubfangvermögen von umgerechnet 16 g/m² PM₁₀ und 12,1 g/m² PM_{2.5} ermittelt. Der deutlich höhere

gemessene Wert im Gegensatz zur Sommerlinde, könnte an den deutlich stärker behaarten Blättern der Silberlinde liegen (Abb. 58).

Messungen zeigten, dass Gehölze mit steiler, fester Blattspreite und unebener Blattoberfläche die Immissionspartikel aus der Luft wirksamer auffangen als solche mit glatten, leicht beweglichen, elastischen Blättern (RANFT 1982).

Quercus robur und *Tilia platyphyllos* zeichnen sich im Vergleich zu den Gehölzen mit weichen, glatten Blättern vor allem durch ein wirksameres Staubfangvermögen der mittlerer (42-100 µm) und gröberen Partikel (> 100 µm) aus (PASKOVA 1989).

Ein besonders hohes Staubfangvermögen im grobkörnigen Bereich zeigten *Fagus sylvatica*, *Corylus avellana*, *Quercus robur*, *Carpinus betulus*, *Betula pendula*, *Tilia platyphyllos* (RANFT 1982).

Eine Hochrechnung der US ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (1976) kalkuliert für alle Bäume (Linden, Eichen, Ahorn) der Stadt St. Louis eine Partikelabsorption von $3,4 \times 10^2$ Tonnen Partikel/ Jahr. Untersuchungen von BROADMEADOW et al. 1998 zeigten, dass sich zwischen 9,2 und 125 kg/ha*y Partikel von Holzgewächsen filtern lassen. MC PHEARSON et al. 1994 fanden Mengen von 234 Tonnen PM₁₀, die durch urbanes Grün in Chicago jährlich gefiltert wurden.

NOWAK et al. 1997 stellten fest, dass sich die Luft in Philadelphia um bis zu 0,72% verbessert hatte, aufgrund der reinigenden Wirkung von Stadtgrün.

Messungen in einem Laubmischwald in Polen, ergaben dass ein Anteil von rund 39,3% der gesamten anorganischen Partikel von dem Wald aufgenommen bzw. gefiltert wurde. Dies bedeutete in diesem Fall eine Menge von $189 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{Vegetationsperiode}^{-1}$ (KWIECIEN 1997).

Nach Angaben von SWAAGSTRA & KLUIVER (2007) können Baumbestände an einer Straße eine Filterleistung für PM₁₀ von 20-30 % erreichen. Andere Forscher geben zwischen 15 und 30 % Filterleistung an, die städtisches Grün erzielen kann (WESSELING et al. 2004). NOWAK et al. (2006) modellierten eine Filtereffizienz von 0,2-1 % der PM₁₀ Belastung pro Vegetationsperiode für Wälder amerikanischer Großstädte. Modellrechnungen von LITSCHKE & KUTTLER (2007) für die Gladbeckerstraße in Essen ergaben bei einer modellierten Bepflanzung von 9000m² und einer angenommenen Depositionsgeschwindigkeit von 0,1cm/s eine Kompensation durch die lokal verkehrsbedingte Zusatzbelastung von 8 %. Nach Hochrechnungen werden ca. 100 g PM₁₀ von einem Einzelstraßenbaum pro Vegetationsperiode gefiltert (WESSELING et al. 2004).

Die Schwierigkeit der genauen Filterleistung liegt an den vielen Parametern die zusammen auf die Leistung einwirken (Oberfläche, klimatische Bedingungen etc.), so dass die aktuellen Hochrechnungen meistens geschätzt und extrapoliert werden.

Für eine optimierte Staubreduktion in der Stadt müssen obligatorische technische Maßnahmen (u.a. Einführung von Partikelfiltern, Emissionsreduktion an der Quelle) mit bedachten, ausgewählten Begrünungsmaßnahmen kombiniert werden (FLOHR & PFANZ 2007).

3.4.2 Eigene Hochrechnungen zur Gesamtfilterleistung

Exemplarisch wurde die Gesamtblattfläche im Labor von *Dracaena marginata* bestimmt und der maximal anhaftende Staub bezogen auf die Fläche berechnet. Die Zimmerpflanze hatte eine Gesamtblattfläche (Ober- und -unterseite des Blattes) von 3647,9 cm². Hochgerechnet auf die jeweiligen Staubfraktionen konnte so ein maximaler Staubauftrag für die Feinstaubfraktionen von 1,7g/Pflanze PM₁₀, 0,8g/Pflanze PM_{2.5} und für die Mittelstaubfraktion 1,43g/Pflanze PM₃₀ ermittelt werden. Bei dieser Hochrechnung sind nur die Blattstrukturen zugrunde gelegt, hinzu kommt ein noch nicht näher quantifizierter Anteil des Stamm-Zweig-Bereichs.

Eine 100-jährige Rotbuche (*Fagus sylvatica*) besitzt etwa 600000 Blätter und eine Blattfläche von 1200 m² (BUFF 1998). Die alleinige Blattfläche eines Einzelbaumes kann somit nach den im Rahmen dieser Arbeit erzielten Ergebnissen 4920g PM₁₀ und 2040g PM_{2.5} filtern. Für eine 100-jährige Eiche (*Quercus robur*) wird eine Blattfläche von 1300m² angegeben (BUFF 1998), somit kann ein Staubfangvermögen von 2470g für PM₁₀ und 2210g PM_{2.5} hochgerechnet werden.

Die in der Literatur angegebenen Werte beziehen sich in der Regel auf die einfache Blattfläche, da sie meist die Assimilationsfläche umfasst. Für die Staubbindung stehen jedoch Blattober- und -unterseiten zu Verfügung. Da aus den Literaturangaben nicht hervorgeht, ob die einfache oder doppelte Blattfläche angegeben wurde, beziehen sich die hier aufgeführten Hochrechnungen zunächst auf die einfache Blattfläche. Unter Berücksichtigung dessen, muss gegebenenfalls die gebundene Staubmenge verdoppelt werden.

4 Zusammenfassung

Die im Rahmen der Untersuchungen festgestellten Daten dienen zum einen dem grundlegenden Verständnis zum Staubfangvermögen pflanzlicher Oberflächen und dessen Auswirkung auf die Photosynthese, zum anderen können praxisbezogene Anwendungen im Hinblick auf geeignete Begrünungen abgeleitet werden.

(1) Mittels turbidimetrischer Trübungsmessungen als auch auf gravimetrischem Weg wurden Staubauflagerungen (Mittelstaub, Feinstaub (PM10 und PM2.5)) auf Blättern als auch auf Zweigstrukturen ausgewählter Pflanzen quantifiziert.

Die Morphologie der Blattoberflächenstruktur ist bestimmend für das Staubfangvermögen. Allgemein zeigte sich, dass eine dichte Behaarung mit einem erhöhten Staubauftrag einherging. Die Arten mit dem größten Staubfangvermögen besaßen alle überwiegend Bündel-, Einfach- und Köpfchenhaare. Innerhalb einer dichten Behaarung schien der Behaarungstyp als auch die Haarlänge weniger von Bedeutung zu sein, da sie innerhalb einer Art eine große Variabilität aufwiesen. Die Dichte der Behaarung war entscheidend für das Bindevermögen. An besonders glatten Oberflächen wurden die geringsten Mengen an Staub festgestellt. Von 82 auf ihr Feinstaubfangvermögen hin untersuchten Arten lagen 22 (15%) über 1 mg/cm² für PM10 und PM2.5, was einem guten Staubfangvermögen entspricht. Einen besonders hohen maximalen Feinstaubauftrag (PM10) des Gesamtblattes konnte bei *Viburnum rhytidophyllum* mit $9,76 \pm 2,59$ mg/cm² festgestellt werden. Ein Verlust der Blattbehaarung im Zuge der Maturation von Blättern bedingte eine signifikante Reduktion des Staubfangvermögens aller Kornfraktionen. Auf den Blattunterseiten wurde insgesamt der meiste Staub gebunden, verstärkt die Feinstäube PM10 und PM2.5, was mit einer starken Behaarung der Unterseite einherging. Innerhalb der taxonomischen Klassifizierung ließ sich kein direkter Zusammenhang zwischen Pflanzenfamilien und Staubfangvermögen feststellen. Unter den untersuchten Arten erzielten Sträucher/Halbsträucher die höchsten Staubaufträge. Untersuchungen an diesjährigen Zweigen zeigten, dass das Staubfangvermögen stark von der Morphologie der Oberfläche abhing und dass hohe Staubwerte mit einer großen Rauigkeit (z.B. durch Haare, Lentizellen, Längsriefen) korrelierten. Generell wiesen jene Arten, deren diesjährige Sprossoberflächen besonders glatt waren, ein geringes Staubfangvermögen auf. Untersuchungen an mehrjährigen Zweigen ergab, dass eine Verkahlung der Sprosse in Kombination mit einem sehr glatten Abschlussgewebe mit einem sinkenden Staubfangvermögen für PM2.5 einherging. Je rauer

und strukturierter eine Zweigoberfläche war und oder auch im Zuge des sekundären Dickenwachstums wurde, desto mehr Staub konnte gebunden werden. Dabei schien zunächst die Behaarung dominierend für das Bindevermögen zu sein und rückte später bei älteren Zweigen in den Hintergrund.

(2) Transmissionsmessungen an maximal bestaubten Blättern zeigten, dass sich durch einen Staubauftrag von Mittelstaub (1 mg/cm^2) die Transmission um etwa 16% reduzierte, die adäquate Menge Feinstaub erzeugte eine Reduzierung der Transmission um 5%. Die ermittelten maximalen Staubfangwerte für Blattflächen lagen größtenteils unter 1 mg/cm^2 PM 10 und PM2.5, so dass davon ausgegangen werden konnte, dass der Einfluss des Staubauftrages der hier eingesetzten Mittel- und Feinstäube auf die Transmission eher gering war.

(3) Über Chlorophyllfluoreszenzmessungen wurde der Einfluss von Staubauf-lagerungen auf die Photosynthese von Blättern mit Hilfe verschiedener Parameter (Absorption, Elektronentransportraten (ETR)) geprüft.

Allgemein konnte bei fast allen untersuchten Arten ein signifikanter Einfluss und eine Reduktion der Absorption auf beiden Blatthälften und mit Fein- als auch Mittelstäuben festgestellt werden. Blattoberseiten waren in der Regel deutlich schwächer bis gar nicht behaart, so dass an diesen Oberflächen generell weniger Staub haften blieb. Auf den Blattunterseiten haftete aufgrund der ausgeprägten Behaarung deutlich mehr Staub, der zu den stärksten Abschwächungen der Absorption führte.

Die bei steigenden Lichtintensitäten (Lichtkurven) gemessenen ETR an bestaubten und unbestaubten Blättern wurden nur in Verbindung mit größeren Staubauf-lagerungen und dichter Behaarung reduziert. Bei Arten mit sehr glatten Oberflächen ohne nennenswerte Behaarung konnte kein signifikanter Rückgang der ETR durch Bestäubung festgestellt werden. Bei höheren Lichtintensitäten bei maximalem Staubauftrag der unterschiedlichen Stäube konnte keine negative Beeinflussung der ETR an Blättern beim überwiegenden Teil der im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Pflanzen festgestellt werden, trotz der teilweise sehr ausgeprägten Behaarung als auch dem hohem Staubauftrag. Insgesamt jedoch verhielten sich die eingesetzten Stäube (Mittelstaub und Feinstäube) sehr ähnlich und beeinflussten bei hohen Lichtintensitäten die Photosynthese nicht.

Abschließend wurde auf Grundlage der erhobenen Daten ein Modell zum optimalen Einsatz von Begleitgrün als auch eine Hochrechnung der GesamtfILTERleistung für ausgewählte Pflanzenarten erstellt.

5 Literaturverzeichnis

AHMED A: (1979): Untersuchungen zur Aerosoldeposition an Oberflächen. Dissertation Universität Gießen

BAFU: BUNDESAMT FÜR UMWELT ABTEILUNG LUFTREINHALTUNG UND NIS (2006): Feinstaub PM10. Fragen und Antworten zu Eigenschaften, Emissionen, Immissionen, Auswirkungen und Maßnahmen.

BAKER N & WEBBER A (1987): Interactions between photosystems. *Advances in Botanical Research* 13, 2-56

BARTHLOTT W & NEINHUIS C (1997): Purity of sacred lotus, or escape from contamination in biological surfaces. *Planta* 202, 1-8

BECK G (1969): Immissionsschutzanpflanzungen. *Neue Landschaft* 4, 163-173

BECKETT K P, FREER-SMITH P, TAYLOR G (1998): Urban woodlands: their role in reducing the effect of particulate pollution. *Environmental Pollution* 99, 347-360

BECKETT K P, FREER-SMITH P, TAYLOR G (2000): Effective tree species for local air-quality management. *Journal of Arboriculture* 26(1), 12-19

BECKETT K P, FREER-SMITH P, TAYLOR G (2000a): The capture of particulate pollution by trees at five contrasting urban sites. *Arboricultural Journal* 24, 209-230. Academic Publishers 2000

BECKETT K P, FREER-SMITH P, TAYLOR G (2000b): Particulate pollution capture by urban trees: effect of species and windspeed. *Global Change Biology* 6, 995-1003

BECKRÖGE W (1999): Entstehung von Inversionen, Inversionsarten. In HELBIG A, BAUMÜLLER J, KERSCHGENS MJ (HRSG.) : Stadtklima und Luftreinhaltung. 21. Aufl. 41- 94

BELOT Y & GAUTHIER D (1975): Transport of micronic particles from atmosphere to foliar surfaces. In: DEVRIES D A, AFGAN N H (eds.): Heat and mass transfer in the biosphere. Wiley, New York, 583-591

BELOT Y, CAMUS H, GAUTHIER D, CAPUT C (1994): Uptake of small particles by tree canopies. *Science of the Total Environment* 157, 1–6.

BERGMANN-LEHNERT J (1962): Methoden zum Nachweis von Verschmutzung von Blattoberflächen. *Wiss. Z. Techn. Univ. Dresden* 11, 571-574

BERNATZKY A (1973): Baum und Mensch. Frankfurt am Main: Kramer

BLUM W (1965): Luftverunreinigung und Filterwirksamkeit des Waldes. *Forst- u. Holzwirt.* 20, 211-215

- BOHNE H** (1963): Schädlichkeit von Staub aus Zementwerken für Waldbestände. *Allgemeine Forstzeitung* 18, 109-111
- BOHNE H** (1973): Wirkungen von Staubimmissionen auf Pflanzen. *Staub - Reinhaltung Luft* 33, 489-491
- BOUBEL R W, FOX D L, TUNER D B, STERN A C** (1994): Fundamentals of Air Pollution. 3. Auflage, Academic Press, San Diego
- BRABEC E, KOVAR P, DEABKOVA A** (1981): Particle deposition in three vegetation stands; A seasonal change. *Atmospheric Environment* 15, 583-587
- BROADMEADOW M, BECKETT K P, JACKSON S, FREER-SMITH P, TAYLOR G** (1998): Trees and pollution abatement. *Forest Research Annual Report and Accounts*. 39-43, HMSO London.
- BRUSE M** (2003): Stadtgrün und Stadtklima. Wie sich Grünflächen auf das Mikroklima in Städten auswirken. *LÖBF-Mitteilungen* 1(03), 66-70
- BRUSE M** (2005): Einsatz von Simulationsmodellen. Vortrag am RVR-Symposium „Grün und Reinhaltung“ am 04.11.2005
- BUFF W** (1998): Bäume im Bild. Wissensch. Verlagsgesellschaft, Stuttgart
- BURKHARDT W** (1912): Die Lebensdauer der Pflanzenhaare. Borno Diss. Leipzig
- CAMPBELL S & NORMAN J M** (1998): An introduction to environmental biophysics. 2nd ed. Springer Verlag Berlin, Heidelberg
- CHAMBERLAIN A C** (1967): Transport of *Lycopodium* spores and other small particles to rough surfaces. *Proceedings of the Royal Society of London, Series A, Mathematical and Physical Science* 296, 46-70
- CHAMBERLAIN A C & CHADWICK R C** (1972): Deposition of spores and other particles on vegetation and soil. *Annals of Applied Biology* 71, 141-158
- CHAMBERLAIN A C** (1975): The movement of particles in plant communities. In: MONTEITH J L (1975): Vegetation and the atmosphere, Volume 1 Principles. Academic Press
- CHAMBERLAIN A C & LITTLE P** (1981): Transport and capture of particles by vegetation. In: GRACE J (eds.) Plants and their atmospheric environment: the 21th symposium of the British Ecology Society. Edinburgh 1979. Blackwell Scientific Publ.
- CONERT H J** (2000): Pareys Gräserbuch. Die Gräser Deutschlands erkennen und bestimmen. Parey Buchverlag
- CORCHNOY S B, AREY J, ATKINSON R** (1992): Hydrocarbon emissions from twelve urban shade trees of Los Angeles, California, air basin. *Atmospheric Environment* 26B(3), 339-348

CROSSLEY A & FOWLER D (1986): The weathering of Scots pine epicuticular wax in polluted and clean air. *New Phytologist* 103, 207-218

CUTTER E G (1976): Aspects of the structure and development of the aerial surfaces of higher plants. In: DICKINSON C H & PREECE T F (eds) (1976): *Microbiology of Aerial Plant Surfaces*, Academic Press

DASCH J M (1986): Measurement of dry deposition to vegetative surfaces. *Water, Air and Soil Pollution* 30, 205-210

DAVIDSON C I & WU Y L (1990): Dry Deposition of Particles and Vapours. In: LINDBERG S E, PAGE A L, NORTON S A (1989): *Acidic Precipitation, Vol. 3, Sources, Deposition and Canopy Interactions*. Springer Verlag

DIEDERICHSEN L (2005): *Feinstaub. Rechtsgrundlagen zum Schutz von Leben und Gesundheit*. - Beuth Verlag

DIEGMANN V, PFÄFFLIN F, WIEGAND G, WURSTHORN H, DÜNNEBEIL F, HELMS H, LAMBRECHT U (2006): Verkehrliche Maßnahmen zur Reduzierung von Feinstaub – Möglichkeiten und Minderungspotentiale. Publikationen des Umweltbundesamtes www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/3259.pdf (Zugriff 01.02.10)

DIN (DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V.) & KRdL (KOMMISSION REINHALTUNG DER LUFT IM VDI UND DIN) (Hrsg.) (2006): *Feinstaub und Stickstoffdioxid. Wirkung-Quellen – Luftreinhaltepläne-Minderungsmaßnahmen*. 1.Auflage. Beuth Verlag Berlin

DOCHINGER L S (1980): Interception on airborne particles by tree plantings. *Journal of environmental quality* 9, 265-268

DRÖSCHER F (1990): Vorkommen und Eintrag von atmosphärischen Partikeln in Waldbestände. Universität Stuttgart, Institut für Verfahrenstechnik und Dampfkesselwesen, Abteilung Reinhaltung der Luft, Bericht-Nr. 18-1989

DÜLL R & KUTZELNIGG H (1994): *Botanisch-ökologisches Exkursionstaschenbuch*. Quelle & Meyer Verlag

DÜRING I, ZIPACK L, BÄCHLIN W, LOHMEYER A (2004): Auswertung der Messungen des Blume während der Abspülmaßnahme am Abschnitt Frankfurter Allee 86. Auftraggeber: Sentasverwaltung für Stadtentwicklung Berlin. www.berlin.de/sen/umwelt/.../endbericht_spuelung_FFA_70095-04-10.pdf (Zugriff 31.03.2010)

DYE J A, ADLER K B, RICHARDS J H, DREHER K L (1997): Epithelial injury induced by exposure to residual oil fly-ash particles: role of reactive oxygen species? *American Journal of Respiratory Cell & Molecular Biology* 17,625-633

EDMONDS R L & DRIVER C H (1974): Dispersion and Deposition of spores of *Fomes annosus* and fluorescent particles. *Phytopathology* 64, 1313-1321

ELLER B M (1972): Messung spektraler Eigenschaften von Blättern im Felde. *Verhandlungen der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft* 152,142-145

- ELLER B M** (1974): Straßenstaub heizt Pflanzen auf. *Umschau* 74, 283-284
- ELLER B M & BRUNNER U** (1975): Der Einfluss von Straßenstaub auf die Strahlungsabsorption durch Blätter. *Arch. Met. Geop. Biokl., Ser.B*, 23, 137-146
- ELLER B M & WILLI P** (1977): Globalstrahlungsabsorption von *Hedera helix* L. unter Straßenstaubimmissionen. *Gartenbauwissenschaft* 42(2), 49-53
- ENGELKE G & MARSCHNER H** (1991): Möglichkeiten des Einsatzes von Kraftwerksreststoffen als Bodensubstrat im Landschaftsbau aus Sicht der Pflanzenernährung. Tagung über die „Verwertung von Reststoffen aus Kohlekraftwerken zur Bodenverbesserung und Pflanzenernährung“ der VGB Technische Vereinigung der Großkraftwerksbetreiber
- ERISMANN J W, DRAAIJERS G, DUYZER J, HOFSCHEUDER P, VANLEEUVEN N, RÖMER F, RUIJGROK W, WYERS P, GALLAGHER M** (1997): Particle deposition to forests – Summary of results and application. *Atmospheric Environment* 31, 321-332
- ERISMANN J W & DRAAIJERS G** (2003): Deposition to forests in Europe: most important factors influencing dry deposition and models used for generalisation. *Environmental Pollution* 124, 379-388
- EU** (1999): EU- Richtlinie 1999/30/ EG des Rates vom 22. April 1999 über Grenzwerte für Schwefeldioxid, Stickstoffdioxid und Stickstoffoxide, Partikel und Blei in der Luft. In: Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften.
<http://www.eur-lex.europa.eu> (Zugriff 08.01.10)
- EUROPEAN COMMISSION, DIRECTORATE GENERAL TRANSPORT AND ENVIRONMENT** (2004): Particulates. Characterisation of exhaust particulate emissions from road vehicles. Deliverable 8. <http://lat.eng.auth.gr/particulates/downloads.html> (Zugriff 18.11.09)
- FARMER A M** (1993): The effects of dust on vegetation – A review. *Environmental pollution* 79, 63-75
- FELLENBERG G** (1999): Umweltbelastungen. Teubner, Stuttgart
- FIM BIOTECH GMBH**: Datenblatt Fimonit
- FLOHR S & PFANZ H** (2007): Grundlagen der Staubfilterung durch Vegetation. In: ENDLICHER W, GORBACHEVSKAYA O, KAPPIS C, LANGNER M (Hrsg.) (2007): Tagungsband zum Workshop über den wissenschaftlichen Erkenntnisstand über das Feinstaubfilterungspotenzial (qualitativ und quantitativ) von Pflanzen am 1. Juni 2007 in Berlin/Adlershof. *Berliner Geographische Arbeiten* 109, S 27-32
- FLÜCKIGER W, FLÜCKIGER-KELLER H, OERTLI J J** (1977): Verschmutzung von Blatt- und Nadeloberflächen im Nahbereich einer Autobahn und deren Einfluss auf den stomatären Diffusionswiderstand. – *Eur. J. For. Path.* 6, 358-364
- FLÜCKIGER W, FLÜCKIGER-KELLER H, OERTLI J J** (1978): Der Einfluss von Straßenstaub auf den stomatären Diffusionswiderstand und die Blatttemperatur- ein antagonistischer Effekt. *Staub - Reinhaltung Luft* 38, 502-505

FOWLER D & LEITH I (1985): Biophysical mechanism in the uptake of air pollutants. *Staub - Reinhaltung Luft* 45 (6), 253-256

FOWLER D, CAPE J.N, COYLE M, FLECHARD C, KUYLENSTIERNA J, HICKS K, DER WENT D, JOHNSON C, STEVENSON D (1999): The global exposure of forests to air pollutants. *Water, Air, and Soil Pollution* 116, 5-32

FRANZE T, WELLER M G, NIESSNER R, PÖSCHL (2005): Protein nitration by polluted air. *Environmental Science and Technology* 39, 1673-1678

FREER-SMITH P H, HOLLOWAY S, GOODMAN A (1997): The uptake of particulates by an urban woodland: Site description and particulate composition. *Environmental Pollution* 95(1), 27-35

FREER-SMITH P H, BECKETT K P, TAYLOR G (2005): Deposition velocities to *Sorbus aria*, *Acer campestre*, *Populus deltoides* × *trichocarpa* 'Beaupré', *Pinus nigra* and *Cupressocyparis leylandii* for coarse, fine and ultra-fine particles in the urban environment. *Environmental Pollution* 133(1), 157-167

FRITSCH B (1990): Mensch-Umwelt-Wissen. Evolutionsgeschichtliche Aspekte des Umweltproblems. Teubner Verlag Stuttgart

FROHNE D & PFÄNDER H J (1997): Giftpflanzen. 4. Auflage Wiss. Verl.-Ges.

FUNKE M (2008): Das Feinstaubfangvermögen ausgewählter Gräser (Poaceae). Unveröffentlichte Hausarbeit, Universität Duisburg-Essen, Institut für Angewandte Botanik

GARBER K (1974): Luftverunreinigungen und ihre Wirkungen. Berlin. Geb. Bornträger

GASSNER G (1973): Mikroskopische Untersuchung pflanzlicher Lebensmittel. 4. Auflage, Gustav Fischer Verlag Stuttgart

GATES D M (1965): Energy, plants and ecology. *Ecology* 46,1-14

GATES D M, KEEGAN H J, SCHLETER J C, WEIDNER V R (1965): Spectral Properties of Plants. *Applied Optics* 11:11-20

GRANTZ D A, GARNER J H B, JOHNSON D W (2003): Ecological effects of particulate matter. *Environment International* 29, 213-239

GREENWOOD S J, COXON J E, BIDDULPH T, BENNETT J (1996): An investigation to determine the particulate size distributions from diesel, petrol and compressed natural gas fuels. SAE Paper

GREGORY P H (1951): Deposition of *Lycopodium* spores and other small particles to rough surfaces. *Proc. R. Soc. A*, 290, 236-65

GREGORY P H (1973): The Microbiology of the Atmosphere. Wiley, New York

GRUITHUIJSEN Y K, GRIESHUBER I, STÖCKLINGER A, TISCHLER U, FEHRENBACH T, WELLER M G, VOGEL L, VIETHS S, PÖSCHL U, DUSCHL A (2006): Nitration enhances the allergenic potential of proteins. *International Archives of Allergy and Immunology* 141, 265-275

GÜNTHER I & WORTHMANN G B (1966): Dust on the surface of leaves. *J. Ultrastruc. Res.* 15. 522 ff

HARTGE K H & HORN R (1999): Einführung in die Bodenphysik. 3. Auflage. Enke Verlag Stuttgart

HASENMÜLLER A (2008): Quantifizierung der Feinstaubauflagerung an Zweigoberflächen mittels turbidimetrischer Methode. Unveröffentlichte Hausarbeit, Universität Duisburg-Essen, Institut für Angewandte Botanik

HECKER U (2008): Einheimische Laubgehölze, 2. Auflage, Quelle & Meyer Verlag

HEICHEL G H & HANKIN L (1976): Roadside coniferous windbreaks as sinks for vehicular lead emissions. *Journal Air. Pollu. Control Assoc.* 26, 767-770

HEINRICHS H & BRUMSACK H J (1997): Anreicherung von umweltrelevanten Metallen in atmosphärisch transportierten Schwebstäuben aus Ballungszentren. In: MATSCHULLAT J, TOBSCHALL H J, VOIGT, H-J (Hrsg.): Geochemie und Umwelt. Relevante Prozesse in Atmo-, Pedo- und Hydrosphäre. Springer Verlag Berlin

HELBING C D (1973): Staubimmissionen im Bonner Stadtgebiet und deren artspezifische Ablagerungen auf Blättern ausgewählter Gehölze. Dissertation Bonn

HENNEBO D (1955): Staubfilterung durch Grünanlagen. Berlin

HIRANO T, KIYOTA M, AIGA I (1995): Physical effects of dust on leaf physiology of cucumber and kidney bean plants. *Environmental Pollution* 89(3),255-261

HLUG (2007): Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie. Feinstaub (PM10). Eigenschaften-Quellen-gesundheitliche Bewertung-Immissionen. http://www.hlug.de/medien/luft/luftmessnetz/dokumente/2007/PM10_Broschuere.pdf (Zugriff 01.02.10)

HOFLACHER H & BAUER H (1982): Light acclimation in leaves of the juvenile and adult life phases of ivy (*Hedera helix*). *Physiol. Plant* 56, 177-182

HOFMANN E & BOMHARD H-G (1956): Vegetationsversuche mit verschiedenen Gaben von Steinkohlenasche auf einem Boden des Ruhrgebietes. In: OBERSTE-BRINK K: Steinkohlenflugasche - Einfluss auf Boden, Pflanzen und Milchkühe. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart

HOLLOWAY P J (1994): Plant cuticles: physicochemical characteristics and biosynthesis. In: PERCY K E, CAPE J N, JAGLES R, SIMPSON C J (eds.): Air pollutants and the leaf cuticle. Springer Berlin

HOSKER R P JR & LINDBERG S E (1982): Atmospheric deposition and plant assimilation of gases and particles. *Atmospheric Environment* 16, 889 ff

HUBBART C E (1985): Gräser- Beschreibung, Verbreitung, Verwendung. Ulmer Verlag

HUMMEL K & STAESCHE K (1962): Die Verbreitung der Haartypen in den natürlichen Verwandtschaftsgruppen. In: ZIMMERMANN W, OZENDA P G (eds): Handbuch der Pflanzenanatomie. IV (5). Plant hairs: 207-250. Gebrüder Borntraeger, Berlin

HUPFER P & KUTTLER W (1998): Witterung und Klima. 10. Auflage. B.G. Teubner Verlag Stuttgart,

IASP (2007): Studie zum wissenschaftlichen Erkenntnisstand über das Feinstaubfilterungspotenzial (qualitativ und quantitativ) von Pflanzen. www.ble.de (Zugriff 08.04.2010)

INGOLD C T (1971): Fungal Spores. Clarendon Press, Oxford

IPCC (2001): Climate Change 2001: The Scientific Basis. Chapt. 5. Aerosols, their Direct and Indirect Effects.

IUTA (Hrsg.) (2004): Identifizierung von Quellgruppen für die Feinstaubfraktion. IUTA Report Nr. LP 15/2004

JUNIPER B E & JEFFREE C E (1983): Plant surfaces. Edward Arnold London

JONAS R (1984): Ablagerung und Bindung von Luftverunreinigungen an Vegetation und anderen atmosphärischen Grenzflächen. Zentralbibliothek der Kernforschungsanlage Jülich

JONAS R (1985): Die Filterwirkung von Wäldern gegenüber staubbelasteter Luft. *Forstwirtschaftliches Zentralblatt* 104, 289-299

KAPPOS D, BRUCKMANN P, EIKMANN T, ENGLERT N, HEINRICH U, HÖPPE P, KOCH E, KRAUSE G H M, KREYLING W G, RAUCHFUSS K, ROMBOUT P, SCHULZ-KLEMP V, THIEL W R, WICHMANN H W (2004): Health effects of particles in ambient air. *International Journal of Hygiene and Environmental Health* 207(4), 399-407

KETELSEN P & KNÖCHEL A (1985): Multielementanalyse von größenklassierten Luftstaubproben. *Staub - Reinhaltung Luft* 45, 175 ff

KISSER J & LEHNERT I (1957): Ein einfaches mikroskopisches Verfahren zur Feststellung des Verschmutzungsgrades von Blattoberflächen. *Mikroskopie Bd. 12*, 243-257

KNOLL D & SCHREIBER L (2000): Plant-Microbe interactions: Wetting of Ivy (*Hedera helix* L.). Leaf surfaces in relation to colonization by epiphytic microorganisms. *Microbial ecology* 41, 33-42

KRZYZANOWSKI M, KUNA-DIBBERT B, SCHNEIDER J (eds.) (2005): Health effects of transport-related air pollution. WHO Regional Office for Europe, Copenhagen.

- KUMAR P & BRITTER R** (2006): Particulate Matter: Importance, Regulations and its Historical Perspective. University of Cambridge.
- KUTTLER W** (1998): Veränderungen des Stadtklimas. In: LOZÁN J L, GRASS H, HUPFER P (eds): Warnsignal Klima. 348-353. Wissenschaftliche Auswertungen, Hamburg
- KUYPERS V H M & DE VRIES E A** (2007): Groen voor lucht. Van theorie naar groene praktijk, toepassingen om lucht te zuiveren. Alterra Wageningen.
www.deboomwekerij.nl (Zugriff 08.04.2010)
- KWIECIEN M** (1997): Deposition of inorganic particulate aerosols to vegetation – a new method of estimating. *Environmental Monitoring and Assessment* 46, 191-207
- LABER I** (1954): Entwicklung und Nekrose einiger kurzlebiger Pflanzenhaare. *Protoplasma* 43, 90-114
- LAHMANN E** (1990): Luftverunreinigung – Luftreinhaltung. Parey Berlin, Hamburg
- LANGNER M** (2002): Analysen zur Staubaufgabe auf Bäumen (*Acer platanoides*) innerstädtischer Standorte. Karlsruher Berichte zur Geographie und Geoökologie. Heft 15
- LANGNER M** (2005): Exponierter innerstädtischer Spitzahorn (*Acer platanoides*) – eine effiziente Senke für PM10? *Karlsruher Schriften zur Geographie und Geoökologie*. Band 21
- LANGNER M** (2006): Natürliche Filter? Die Filterung von Feinstäuben durch Stadtbäume. *TASPO* 3: 20-23
- LANGNER M** (2007): Staubumsatz in verkehrsexponierten Baumkronen und Partikelverteilung in städtischen Grünflächen. In: ENDLICHER W, GORBACHEVSKAYA O, KAPPIS C, LANGNER M (Hrsg.): Tagungsband zum Workshop über den wissenschaftlichen Erkenntnisstand über das Feinstaubfilterungspotenzial (qualitativ und quantitativ) von Pflanzen am 1. Juni 2007 in Berlin/Adlershof. Berliner Geographische Arbeiten 109
- LARCHER W** (2001): Ökophysiologie der Pflanzen (6. Auflage). UTB Verlag
- LEH H O** (1993): Ökologische Aspekte des Stadtgrüns. *Das Gartenamt* 4, 241-249
- LENSCHOW P, ABRAHAM H-J, KUTZNER K, LUTZ M, PREUß J-D, REICHENBÄCHER W** (2001): Some ideas about the sources of PM10. *Atmospheric Environment* 35(1), 23-33
- LEVIN D A** (1973): The role of trichomes in plant defense. *Quarterly Review of Biology* 48, 3-15
- LFU/UMEG** (Hrsg.)(1998): Schwebstaubbelastrung in Baden-Württemberg. Karlsruhe

LICHTENTHALER H K, BUSCHMANN C, DÖLL M, FIETZ H J, BACH T, KOZEL U, MEIER D, RAHMSDORF U (1981): Photosynthetic activity, chloroplast ultrastructure and leaf characteristics of high-light and low light plants and of sun and shade leaves. *Photosynth. Res.* 2, 115-141

LINDBERG S E, LOVETT G M, SCHAEFER D A, BREDEMEIER M (1988): Coarse aerosol deposition velocities and surface-to-canopy scaling factors from forest canopy throughfall. *Journal of Aerosol Science* 19, 1187-1190

LITSCHKE T & KUTTLER W (2007): Die Filterung von Partikeln durch Vegetation – ein Literaturüberblick. METTOOLS VI Fachtagung des Fachausschusses Umwelt-meteorologie der Deutschen Meteorologischen Gesellschaft. 24.-26. April in Garmisch-Partenkirchen.

LUBW (2007): Einflussgrößen auf die zeitliche und räumliche Struktur der Feinstaubkonzentrationen.
www.lubw.baden-wuerttemberg.de/.../feinstaub-einfluesse_endfassung.pdf
(Zugriff 18.03.2010)

LOHMEYER A & DÜRING I (2001): Validierung von PM10-Immissionsberechnungen im Nahbereich von Straßen und Quantifizierung der Feinstaubbildung von Straßen. Ingenieurbüro Dr.-Ing. Achim Lohmeyer, Radebeul. Projekt 2286/C, Juni 2001. Gutachten im Auftrag von: Senatsverwaltung für Stadtentwicklung Berlin und Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Dresden

LOVETT G M & REINERS W A (1986): Canopy structures and cloud water deposition in subalpine coniferous forests. *Tellus* 38B, 319-410

MARQUES M C (1999): Eintrag von luftgetragenen partikelgebundenen Spurenstoffen in Wäldern durch trockene Deposition. Göttingen, Univ. Diss., Wiss.Verlag Berlin

MCPHERSON E G, NOWAK D J, ROWNTREE R E (1994): Chicago's Urban Forest Ecosystem: Results of the Chicago Urban Forest Climate Project. USDA General Technical Report NE-186

METTO J (2008): Urbane Vegetation – Eine sinnvolle Maßnahme zur Feinstaubreduktion? Begrünungen als Maßnahme zur Feinstaubreduktion in Luftreinhalte- und Aktionsplänen am Beispiel ausgewählter deutscher Städte. VDM Verlag Dr. Müller.

MISRA J, PANDEY V, AHMAD K J (1993): Effect of cement dust on petal morphology of *Brassica campestris* L. *Feddes Repertorium* 105(5-6), 383-386

MITSCHERLICH G (1975): Wald Wachstum und Umwelt. Eine Einführung in die ökologischen Grundlagen des Waldwachstums. 3. Band. Boden Luft und Produktion. J.D. Sauerländer's Verlag, Frankfurt am Main

MÖLLER D (2003): Luft-Chemie, Physik, Biologie, Reinhaltung, Recht. De Gruyter Verlag, Berlin

- NÄGELI W** (1943): Untersuchungen über die Windverwehungen im Bereich von Windschutzstreifen. *Mitteilungen d. schweizer. Anst. f. d. forstl. Versuchswesen*. 23, 223-276
- NÄGELI W** (1954): Die Windbremsung durch einen größeren Waldkomplex. Bericht 11. Kongress Internationalen Verband forstl. Forsch. Anst., 240-246
- NEINHUIS C & BARTHLOTT W** (1997a): Seasonal changes of leaf surface contamination in beech, oak, and ginkgo in relation to leaf micromorphology and wettability. *New Phytol.* 138, 91-98
- NEINHUIS C & BARTHLOTT W** (1997b): Characterization and distribution of water-repellent self-cleaning plant surfaces. *Annals of Botany* 79, 667-677
- NEUBERGER H, HOSLER C C, KOEMOND C** (1967): Vegetation as an aerosol filter. In: TROMP S W & WEIHE W H (eds): *Biometeorology* 2. Pergamon Press, New York
- NISHIO J N** (2000): Why are higher plants green? Evolution of the higher plant photosynthetic pigment complement. *Plant Cell Environment* 23, 539-548
- NORRA S** (1997): Anorganische Schadstoffbelastung in Stäuben, Straßensedimenten, Böden und Pflanzen entlang innerstädtischer Straßen. *Karlsruher Berichte zur Geographie und Geoökologie*. Heft 10
- NOWAK D J, MCHALE P J, IBARRA M, CRANE D, STEVENS J C, LULEY C J** (1997): Modeling the effects of urban vegetation on air pollution. In: 22nd NATO/CCMS International Technical Meeting on Air Pollution Modelling and its Application, 276-282. NATO/CCMS Brussels
- NOWAK D J, CRANE D E, STEVENS J C** (2006): Air pollution removal by urban trees and shrubs in the United States. *Urban Forestry & Urban Greening* 4, 115-123
- OLSCHOWY G** (1966): Industrielle Immissionsschäden und Wald. *Der Forst- u. Holzwirt*, 22, 487-493
- PAKLEPPA M** (2008): Das Staubfangvermögen der Achsenorgane ausgesuchter Holzgewächse. Unveröffentlichte Hausarbeit, Universität Duisburg-Essen, Institut für Angewandte Botanik
- PASKOVA M** (1989): Bewertung ausgewählter Baum- und Straucharten nach ihrem Staubfangvermögen. *Mitteilungen der Deutschen Dendrologischen Gesellschaft*, 79, 141-147
- PELLEGRINO F & ALFANO R R** (1982): Time resolved fluorescence spectroscopy. In: ALFANO, R R (ed.): *Biological events probed by ultrafast laser spectroscopy*. Academic Press, New York
- PETERS A, SCHULZ H, KREYLING W G, WICHMANN H E** (1998): Feine und ultrafeine Partikel. In: WICHMANN H E, SCHLIPKÖTER H W, FÜLGRAFF G (Hrsg.): *Handbuch der Umweltmedizin*. Ecomed Verlag

- PETERS A, HEINRICH J, WICHMANN H E** (2002): Gesundheitliche Wirkungen von Feinstaub – Epidemiologie der Kurzzeiteffekte. *Umweltmed. Forschung Prax.* 7, 101-115
- PETERS K & EIDEN P** (1992): Modelling the dry deposition velocity of aerosol particles to a spruce forest. *Atmospheric Environment* 26A, 2555-2564
- PFANZ H, WEIKERT R, HEBER U, LANGE O L** (1990): Photosynthesis of damages and undamaged forest trees. A study with spruce in the Fichtelgebirge. In: ULRICH B (ed) *Int. Congr. Forst Decline Research*, Friedrichshafen, KFA Karlsruhe FGR, 527-550
- PFANZ H & BEYSCHLAG W** (1993): Photosynthetic performance and nutrient status of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) at forest sites in the Ore Mountains (Erzgebirge). *Trees* 7: 115-122
- PFANZ H, FLOHR S, WITTMANN C** (2006): Das Staubfangvermögen von Vegetation. Grundlagen und erste Ergebnisse aus der Praxis. *TASPO* 3, 12-15
- PFANZ H & FLOHR S** (2007): Die Wirkung von Holzgewächsen auf Stäube und die mögliche Rückwirkung der Stäube auf die Pflanzen. In: ROLOFF A, THIEL D, WEIß H (Hrsg.) (2007): *Urbane Gehölzverwendung im Klimawandel und aktuelle Fragen der Baumpflege. Forstwirtschaftliche Beiträge Tharandt*, Beiheft 6, 58- 66
- PÖSCHL U** (2006): Kleine Partikel mit großer Wirkung auf Klima und Gesundheit. Geo- und Klimaforschung Mikrobiologie/Ökologie. Tätigkeitsbericht 2006. Max-Planck-Institut für Chemie, Mainz.
www.mpch-mainz.mpg.de/mpg/bilder/forschung/poeschl.pdf (Zugriff 08.02.10)
- POPE C A** (2000): Epidemiology of fine particulate air pollution and human health: Biological mechanisms and who's at risk? *Environmental Health Perspectives* 108 (4), 713-723
- POPE C A** (2000a): Review: Epidemiological basis for particulate air pollution health standards. *Aerosol Science and Technology* 32, 4-14
- PORSTENDÖRFER J, RÖBIG G, AHMED A** (1979): Experimental Determination of the Attachment Coefficients of Atoms and Ions on Monodisperse Aerosols. *Journal of Aerosol Science* 10, 21-28
- RANFT H** (1982): Möglichkeiten der Industrieumgrünung durch Gehölze unter Immissionsbedingungen. *Beiträge für die Forstwirtschaft* 1, 26-28
- RASCHKE K** (1970): Leaf hydraulic system: rapid epidermal and stomatal responses to changes in water supply. *Science* 167, 189-191
- RAUTERBERG-WULF A** (1998): Beitrag der Reifen- und Bremsabriebs zur Russimmission an Straßen. Fortschritt-Berichte VDI Reihe 15, Nr 202 Düsseldorf
- RAYNOR G S, SMITH M E, SINGER I A, COHEN L A, HAYES J V** (1966): The dispersion of ragweed pollen into a forest. *Proc. 7th National Conf. Agricultural Meteorology*.

RAYNOR G S (1967): Effects of a forest on particulate dispersion. In: MAWSON C A Proc. USAEC Meteorological Information Meeting, Chalk River Nuclear Laboratories. 581-586

REGIONALVERBAND RUHR: Herkunft und Zusammensetzung der Feinstäube. www.rvr-online.de/landschaft/saubere_Luft/herkunft_staub.php (Zugriff 14.01.10)

RENTSCHLER I (1982): Eine Methode zur Trennung abgelagerter und eingelagerter Stoffe bei Pflanzenblättern. *Naturwissenschaften* 68, Springer Berlin

RICHTLINIE 2008/50/EG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 21.Mai 2008 über Luftqualität und saubere Luft für Europa. Amtsblatt der Europäischen Union

RICKS G R & WILLIAMS R (1974): Effects of atmospheric pollution on deciduous woodland. Part 2: effects of particulate matter upon stomatal diffusive resistance in leaves of *Quercus petraea*. (Mattuschka) Leibl. *Environmental Pollution* 6, 87-109

SACHS L (1995): Angewandte Statistik-Anwendung statistischer Methoden. Springer

SCHREIBER H, JENDEREK H, ROTH C (1993): Messung der trockenen Deposition auf Laub- und Nadelbäumen mittels natürlich radioaktiver Tracer. – KfK-PEF 110, Kernforschungszentrum Karlsruhe.

SCHREIBER U, BILGER W, NEUBAUER C (1994): Chlorophyll fluorescence as an nonintrusive indicator for rapid assessment of in vivo photosynthesis. In :SCHULZE E D, CADWELL, M M (eds.)(1994): Ecophysiology of photosynthesis 100:48-70. Springer, Berlin

SCHREIBER U (1997): Chlorophyllfluoreszenz und photosynthetische Energieumwandlung. Heinz Walz GmbH, Effeltrich

SCHREIBER U (2001): In vivo Chlorophyllfluoreszenz: Analyse und Zustandsdiagnose der Photosynthesefunktion. In: LARCHER W (eds): Ökophysiologie der Pflanzen. Ulmer Verlag, Stuttgart. 77-80

SCHRETZENMAYR M & ULLRICH T (1979): Staubfilterung von Baum- und Straucharten an Waldrändern. *Die Sozialistische Forstwirtschaft* 29, 117-119

SCHUBERT R (1991): Lehrbuch der Ökologie. 3.Auflage, Fischer Verlag Jena

SCHULZE R (1970): Strahlenklima der Erde. Steinkopff Verlag Darmstadt

SEHMEL G (1980): Particle and gas dry deposition: a review. *Atmospheric Environment* 14, 983-1011

SIEVERING H, ENDERS G, KINS L, KRAMM G, RUOSS K, ROIDER G, ZELGER M, ANDERSON L, DLUGI R (1994): Nitric acid, particulate nitrate and ammonium profiles at the Bayerischer Wald: evidence for large deposition rates of total nitrate. *Atmospheric Environment* 28(2), 311-315

- SIMMLEIT N, RUMP H, SCHULTEN H R** (1986): Nichtabwaschbare Aerosolteilchen auf den Oberflächen von Koniferennadeln. *Staub Reinhaltung der Luft*, 46(5), 256-258
- SITTE P, ZIEGLER H, EHRENDORFER F, BRESINSKY A** (1999): Strasburger – Lehrbuch der Botanik. 35. Auflage, Spektrum Akademischer Verlag, Gustav Fischer Heidelberg
- SLINN W** (1982): Predictions for particle deposition to vegetative canopies. *Atmospheric Environment* 16, 1785-1794
- SMITH W H** (1976): Air pollution – Effects on the structure and function of plant-surface microbial-ecosystems. In: DICKINSON C H, PREECE T F (eds) (1976): Microbiology of Aerial Plant Surfaces, Academic Press
- SMITH W H** (1990): Air pollution and forests. Interaction between air contaminants and forest ecosystems. Second Edition, Springer Verlag
- SPERBER A** (1975): Auswirkungen von Staub auf Photosynthese und Stoffproduktion verschiedener Pflanzen. Dissertation Bonn
- STEINHÜBEL G & HALAS L** (1967): Störungen der Trockensubstanzbildungen bei durch Staubimmissionen hervorgerufenen Temperaturen der Blätter von Gehölzen. *Lesnicki casopis* 13 (XL) 365-383
- STEUBING L & KLEE R** (1970): Comparative investigations into the dust filtering effects of broad leaved and coniferous woody vegetation. *Angewandte Botanik* 4, 73-85
- STEUBING L, KLEE R, KIRSCHBAUM U** (1974): Beurteilung der lufthygienischen Bedingungen in der Region Untermain mittels niederer und höherer Pflanzen. *Staub-Reinhaltung Luft* 34, 206-209
- SUTTON M A, DRAGOSITS U, DORE A J, McDONALD A G, TANG Y S, VAN DIJK N, BANTOCK T, HARGREAVES K J, SKIBA U, SIMMONS I, FOWLER D, WILLIAMS J, BROWN L, HOBBS P, MISSELBROOK T** (2004): The potential on NH₃, N₂O and CH₄ measurements following the 2001 outbreak of Foot and Mouth Disease in Great Britain to reduce the uncertainties in agricultural emissions abatement. *Environmental Science & Policy* 7, 177-194
- SWAAGSTRA H & DE KLUIVER P P** (2006): Integrales Technisches Grün. Bepflanzung als Hightech-Lösung gegen Luftverschmutzung. *TASPO* 3, 24-26
- SWAAGSTRA H & DE KLUIVER P P** (2007): The appliance of Integral Technical Green Design to optimize residential quality and for means of purification of air and water in X. Basics of Technology. Babberich: ES Consulting
- TAIZ L & ZEIGER E** (2000): Physiologie der Pflanzen. Spektrum Akademischer Verlag
- THOM A S** (1975): Momentum, mass and heat exchange of plant communities. In: MONTEITH J L (1975): Vegetation and the atmosphere. Band 1: Principles, 57-109. Academic Press London

THÖNNESSEN M (2002): Elementdynamik in fassadenbegrünendem Wilden Wein (*Parthenocissus tricuspidata*). Nährelemente, Anorganische Schadstoffe, Platin-Gruppen-Elemente, Filterleistung, Immissionshistorische Aspekte, Methodische Neu- und Weiterentwicklungen. Universität zu Köln, Geographisches Institut. Kölner Geographische Arbeiten Heft 78

THÖNNESSEN M & HELLACK B (2005): Staubfilterung durch Gehölzblätter. Anreicherung und Vermeidung von Stäuben bei Wildem Wein und Platane. *Stadt + Grün* 12, 10-15

THÖNNESSEN M (2006): Feinstaub und Vegetation. Die EU-Feinstaubverordnung als Impuls für mehr Grün in den Städten. *TASPO* 3, 8-11

ULLRICH T (1976): Zur Staubfilterwirkung von Waldrändern unter besonderer Berücksichtigung des Staubfangvermögens einiger Baum- und Straucharten. Dissertation TU Dresden

ULLRICH T (1980): Bestimmung des artspezifischen Staubfangvermögens von Laubgehölzen. *Archiv für Naturschutz und Landschaftsforschung* 20, 43-59

ULLRICH C (2007): Wirkung von Feinstäuben auf Pflanzen - Phototoxizität von Flugasche und Silikatstäuben. In: ENDLICHER W, GORBACHEVSKAYA O, KAPPIS C, LANGNER M (Hrsg.) (2007): Tagungsband zum Workshop über den wissenschaftlichen Erkenntnisstand über das Feinstaubfilterungspotenzial (qualitativ und quantitativ) von Pflanzen am 1. Juni 2007 in Berlin/Adlershof. *Berliner Geographische Arbeiten* 109, 47-59

UMWELTBUNDESAMT (2009): Jährliche Auswertung Feinstaub 2009 www.envit.de/umweltbundesamt/luftdaten/download/public/docs/pollutants/PM10/Jahr/PM10_2009.pdf (Zugriff 13.08.2010)

UMWELTBUNDESAMT (2010): Aktuelle Immissionsdaten und Ozonvorhersage www.env-it.de/umweltbundesamt/luftdaten/trs.fwd?comp=PM1#Fristverlaengerung, (Zugriff 13.08.2010)

UMWELTBUNDESAMT GMBH WIEN (HRSG.) (2006): Schwebstaub in Österreich. Fachgrundlagen für eine kohärente österreichische Strategie zur Verminderung der Schwebstaubbelastung. www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/BE277.pdf (Zugriff 08.03.2010)

UPHOF J C TH (1962): Plant hairs. - In ZIMMERMANN W, OZENDA P G (eds): Handbuch der Pflanzenanatomie. IV (5) 1-206. Gebrüder Borntraeger, Berlin

U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (1976): Open space as an air resource management measure. Vol I. Sink factors. U.S.E.P.A. Publ. No. EPA-450/3/76-028a, Research Triangle Park, NC.

VAN BAAREN M, DAARDER R, GENT C, JANSSEN D, MARECHAL M, TEPEMA A (2007): Bomen op Bedriventerreinen. 2000 bomen voor Westpoort. Dienst Ruimtelijke Ordening Amsterdam

VARDAKA E, COOK C M, LANARAS T, SGARDELIS S P, PANTIS J D (1995): Effect of dust from a limestone quarry on the photosynthesis of *Quercus coccifera*, an evergreen sclerophyllus shrub. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* 54, 414-419

VON WILLERT D J, MATYSSEK R, HERPPICH W (1995): Experimentelle Pflanzenökologie. Thieme Verlag

WANG L, LIU L-Y, GAO S-Y, HASI E, WANG Z (2006): Physicochemical characteristics of ambient particles settling upon leaf surfaces of urban plants in Beijing. *Journal of Environmental Science (China)* 18(5), 921-926

WEDDING J (1977): Aerosol deposition on plant leaves. *Water, Air and Soil Pollution* 7, 545-550

WEN D, KUANG Y, ZHOU G (2004): Sensitivity analyses of woody species exposed to air pollution based on ecophysiological measurements. *Environmental Science & Pollution Research* 11(3), 165-170

WENTZEL K F (1968): Die Immissionsresistenz der Pflanzen. *Baum-Zeitung* 2, 42 ff

WESSELING J P, DUYZER J, TONNEIJCK A E G, VAN DIJK C J (2004): TNO-rapport R2004/383. Effecten van groenelementen op NO₂ en PM10 concentraties in de buitenlucht. TNP Milieu, Energie en Procesinnovatie.
www.wur.nl/NR/rdonlyres/45B6361F-B81D.../7Ra2004383rapport.pdf
(Zugriff 08.04.2010)

WESTERKAMP C & DEMMELMEYER H (1997): Blattoberflächen mitteleuropäischer Laubgehölze. Atlas und Bestimmungsschlüssel. Gebrüder Borntraeger, Berlin, Stuttgart

WHO (2003): Health aspects of air pollution with particulate matter, ozone and nitrogen dioxide. Report on a working group meeting, Bonn, Germany, 13-15 January 2003
<http://www.euro.who.int/Document/e79097.pdf> (Zugriff 08.01.10)

WHO (2004): Health aspects of air pollution. Results from the WHO "systematic review of health aspects of air pollution in Europe".
<http://ec.europa.eu/environment/archives/air/cafe/activities/pdf/e83080.pdf>
(Zugriff 08.01.10)

WHO (2005): WHO quality guidelines global update 2005. Report on a working group meeting, Bonn, Germany, 18-20 October 2005
<http://www.euro.who.int/document/e87950.pdf> (Zugriff 08.01.10)

WOLVERTON B C (1989): Foliage plants for improving indoor air quality. NASA-TM-108055, National Foliage Foundation Interiorscape Seminar

ZIMMERMANN R, SCHNELLE-KREIS J, SKLORZ M (2006): Durch die Lupe betrachtet- Messtechnik, Eigenschaften und chemische Zusammensetzung feiner und ultrafeiner Partikel. Feinstaubtagung Augsburg 2006
http://www.helmholtz-muenchen.de/fileadmin/FLUGS/PDF/Veranstaltungen/Aerosol_Zimmermann.pdf (Zugriff 08.01.10)

6 Anhang

6.1 Abkürzungsverzeichnis

Al	Aluminium
C	Kohlenstoff
Ca	Calcium
Cd	Cadmium
cm ²	Quadratzentimeter
Cu	Kupfer
ETR	Elektronentransportrate [$\mu\text{mol Elektronen/m}^2\text{s}$]
F	Fluoreszenz
Fe	Eisen
FG	Frischgewicht
Fm	maximale Fluoreszenzausbeute
Fo	minimale Fluoreszenzausbeute
Fv	variable Fluoreszenzausbeute
Fv/Fm	maximale Quantenausbeute von PSII
K	Kalium
Mg	Magnesium
mg	Milligramm
Na	Natrium
NH ₃	Ammoniak
NH ₄ ⁺	Ammonium
ns	nicht signifikant
NO ₂	Stickstoffdioxid
NO ₃ ⁻	Nitrat
O ₂	Sauerstoff
OS	Blattoberseite
P	Photochemische Fluoreszenzauslöschung
PAK	polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe bzw. PAH „polycyclic aromatic hydrocarbons“ (z.B. Benzopyren)
Pb	Blei
PFD	Photonenflussdichte
PhAR	Photosynthetisch aktive Strahlung, 380-720nm
PM	Particulate matter
PM _{2,5}	Partikel mit einem aerodynamischen Durchmesser $\leq 2,5 \mu\text{m}$. Partikel, die einen Einlass mit einer 50% Abscheideeffizienz bei $2,5 \mu\text{m}$ aerodynamischem Durchmesser passieren
PM ₁₀	Partikel mit einem aerodynamischen Durchmesser $\leq 10 \mu\text{m}$. Partikel, die einen Einlass mit einer 50% Abscheideeffizienz bei $10 \mu\text{m}$ aerodynamischen Durchmesser passieren
PSI	Photosystem I
PSII	Photosystem II
qN	nichtphotochemisches Quenching
qP	photochemisches Quenching
R ²	Quadrat des Korrelationskoeffizienten; Bestimmtheitsmaß
S	Schwefel
SD	Standardabweichung (Standard deviation)
Si	Silizium

SO ₂	Schwefeldioxid
SO ₄ ²⁻	Sulphat
TSP	(total suspended particulate matter): Schwebstaub mit einer Sinkgeschwindigkeit ≤ 10 cm/s; Teilchen mit einem aerodynamischen Durchmesser kleiner als 57 µm
US	Blattunterseite
\bar{x}	Mittelwert
Yield	effektive Quantenausbeute von PSII
Zn	Zink
µg	Mikrogramm
Ø	Durchmesser

6.2 Abbildungsverzeichnis

Abb. 1:	Windgeschwindigkeiten in homogenen Beständen von Goldrute (<i>Solidago virgaurea</i>) nach artifizieller Bewindung (PFANZ et al. 2006)....4
Abb. 2:	PM10-Emissionen in Deutschland 1998 (LENSCHOW et al 2001).....11
Abb. 3:	Durchschnittliche chemische Zusammensetzung eines urbanen Aerosols, verändert nach LFU/UMEG 1998.....12
Abb. 4:	Partikel in der Troposphäre (ZIMMERMANN et al 2006).....14
Abb. 5 :	Trägheitsabscheidung und elektrostatische Anziehung nach BOUBEL et al 1994.....20
Abb. 6:	Sporen von <i>Lycopodium clavatum</i>24
Abb. 7:	Eichkurve Fimonit, n=10, dargestellt ist der Mittelwert und SD mit linearer Trendlinie, Geradengleichung und Bestimmtheitsmaß.....32
Abb. 8:	Darstellung der wichtigsten Fluoreszenzparameter zur Bestimmung der PSII Quantenausbeute bei Verwendung des PAM-Fluorometers (SCHREIBER et al 1994).....37
Abb. 9:	Versuchsaufbau Imaging-PAM mit eingespannter Blattprobe vor Verdunkelung.....39
Abb. 10:	Unterseiten von ausdifferenzierten Blättern von (a) <i>Viburnum rhytidophyllum</i> und (b) <i>Fagus sylvatica</i>47
Abb. 11:	Blattunterseite von <i>Viburnum rhytidophyllum</i> mit dicht filziger Behaarung bestaubt mit Mittelstaub.....47
Abb. 12:	Blattunterseite von <i>Sorbus intermedia</i> bestaubt mit Mittelstaub (<i>Lycopodium</i>).....48
Abb. 13:	Blattunterseiten von <i>Ribes sanguineum</i> , (a) mit flächiger Einfachbehaarung (25 fach vergrößert), (b) Detailaufnahme Einfachhaar (50 fach vergrößert).....48
Abb. 14:	Verschiedene Formen pflanzlicher Haare. (a) Einzelhaare an der Blattunterseite von <i>Rubus fruticosus</i> , (b) Sternhaare von <i>Virola surinamensis</i> , (c) Schildhaare von <i>Hippophae rhamnoides</i> , (d) widerhakige Gebilde auf der Samenschale von <i>Cynoglossum officinale</i> . Abbildungen a-d aus SITTE et al 1999.....51
Abb. 15:	Bündelhaare auf der Blattunterseite von <i>Viburnum rhytidophyllum</i> (a) dichtes Geflecht aus mehreren Schichten Haare bestaubt mit Feinstaub, (b) einzelnes Bündelhaar unbestaubt, (c) Ausschnitt eines bestaubten Bündelhaares mit Feinstpartikeln.....60

- Abb. 16:** Blätter von *Phlomis fruticosa* **(a)** Blattoberseite und **(b)** Blattunterseite mit dichter Behaarung mit Bündelhaaren. 50fache Vergrößerung.....61
- Abb. 17:** Blätter von *Rhus typhina* **(a)** Blattunterseite und **(b)** Blattoberseite mit lichter Behaarung mit Einfach- und Köpfchenhaaren (WESTERKAMP & DEMMELMEYER 1997).....61
- Abb. 18:** Junges, undifferenziertes Blatt von *Platanus x hispanica* **(a)** Blattoberseite **(b)** Blattunterseite jeweils mit Etagenhaaren.....62
- Abb. 19:** Blattoberseiten von *Platanus x hispanica* im rasterelektronischen Bild. **(a)** ungereinigte Blattoberfläche im Oktober 2003, **(b)** gereinigte Blattoberfläche (THÖNNESSEN & HELLACK 2005).....63
- Abb. 20:** Blattflächen von *Robinia pseudoacacia*. **(a)** Blattunterseite **(b)** Blattoberseite, beide Seiten mit wenigen vereinzelt Einfachhaaren (WESTERKAMP & DEMMELMEYER 1997).....64
- Abb. 21:** Blattoberflächen von *Quercus rubra* **(a)** Blattunterseite **(b)** Blattoberseite mit sehr vereinzelt Einfach- und Bündelhaaren und *Quercus robur* **(c)** Blattunterseite **(d)** Blattoberseite mit vereinzelt Einfach-, Bündel- und Köpfchenhaare (WESTERKAMP & DEMMELMEYER 1997)64
- Abb. 22:** Konidien und Hyphen des Eichenmehltau (*Microsphaera alphitoides*) auf einem Blatt von *Quercus robur*.....65
- Abb. 23:** Epikutikuläre Wachse: **(a)** aggregierte Wachsplättchen von *Hypericum buckleyi*, **(b)** Wachsplättchen bei *Leycesteria chartacea*, **(c)** Wachs-röhrchen bei *Lonicera tatarica* (SITTE et al 1999).....67
- Abb. 24:** Blattoberflächen von *Parthenocissus tricuspidata* **(a)** Ausschnitt des Hauptnervs mit Einfachhaaren auf der Blattunterseite bestäubt mit Feinstaub, **(b)** Blattoberseite ohne Behaarung. *Lavandula angustifolia* **(c)** Blattoberseite mit dichter filziger Behaarung, bestäubt mit Feinstaub **(d)** Blattunterseite mit Bündel- und Köpfchenhaare mit ätherischen Ölen.....68
- Abb. 25:** Blattflächen verschiedener Pflanzen. **(a-c)** Blattunterseite von *Phlomis fruticosa* **(a)** Bündelhaare **(b)** bestäubt mit Feinstaub **(c)** bestäubt mit Mittelstaub; **(d-f)** Blattunterseite von *Viburnum lantana* **(d)** Büschelhaare **(e)** bestäubt mit Feinstaub **(f)** behaarter Blattnerv mit Mittelstaub bestäubt; **(g-i)** Blattunterseite von *Buddleja davidii* **(g)** Einfachhaare **(h)** bestäubt mit Feinstaub **(i)** bestäubt mit Mittelstaub.....70
- Abb. 26:** Köpfchenhaar von *Ribes sanguineum* (FROHNE & PFÄNDER 1997).....70
- Abb. 27:** Blattoberflächen von *Althaea officinalis* **(a)** Blattunterseite, Hauptnerv mit dichten Büschelhaaren, **(b)** mit Feinstaub bestäubter Hauptnerv, **(c)** Blattoberseite bestäubt mit Feinstaub, **(a)** und **(b)** 50fache Vergrößerung, **(c)** 25fache Vergrößerung.....72

- Abb. 28:** Blattbehaarung von *Salvia officinalis* **(a)** Einzelhaare und Drüsen-schuppen, GASSNER 1973; **(b)** mit Feinstaub bestaubte Haare der Blatt-unterseite, 25-fache Vergrößerung, eigene Darstellung; **(c)** Einzelhaare der Hauptnerven auf der Blattunterseite, 25-fache Vergrößerung eigene Darstellung.....72
- Abb. 29:** Hauptnerv der Blattunterseite von *Calathea rufibarba* **(a)** bestaubt mit Feinstaub und **(b)** unbestaubte Kontrolle 50-fache Vergrößerung.....73
- Abb. 30:** Glatte, unbehaarte Blattflächen verschiedener Pflanzen **(a)** Blattober-seite von *Carpinus betulus* **(b)** Blattunterseite von *Clematis vitalba* bestaubt mit Mittelstaub **(c)** Blattoberseite von *Parthenocissus tricuspidata* **(d)** Blattunterseite von *Parthenocissus tricuspidata*.....74
- Abb. 31:** Maximaler Staubauftrag verschiedener Kornfraktionen der Blätter (n=25) von *Viburnum rhytidophyllum* differenziert nach Blattober- und -unterseite. Die Unterschiede im maximalen Staubauftrag zwischen Blattober- u. -unterseite sind höchstsignifikant.....77
- Abb. 32:** Blatt von *Viburnum rhytidophyllum* **(a)** Blattoberseite mit einzelnen Haaren **(b)** Blattunterseite mit einer dichten Behaarung mit Bündel-haaren.....78
- Abb. 33:** Maximaler Staubauftrag verschiedener Kornfraktionen der Blätter (n=25) von *Dracaena marginata* differenziert nach Blattober- und -unterseite. Die Unterschiede im maximalen Staubauftrag zwischen Blattober- u. -unterseite sind höchst signifikant (***), signifikant (*) bzw. nicht signifikant (ns).....79
- Abb. 34:** Blattoberflächen von *Dracaena marginata* **(a)** mit Feinstaub bestaubt und **(b)** unbestaubte Kontrolle.....79
- Abb. 35:** Maximaler Staubauftrag verschiedener Kornfraktionen der Blätter (n=25) von *Quercus rubra* differenziert nach Blattober- und -unterseite. Die Unterschiede im maximalen Staubauftrag zwischen Blattober- u. -unterseite sind höchst signifikant (***).....80
- Abb. 36:** Bündelhaare auf der Blattunterseite von *Viburnum rhytidophyllum* bestaubt mit Feinstaub, 50-fache Vergrößerung.....82
- Abb. 37:** Staubfangvermögen [mg/cm²] von Blättern der Rotbuche (*Fagus sylvatica*) in Abhängigkeit des Blattalters. Dargestellt sind Mittelwert (n=25) und Standardabweichung.....83
- Abb. 38:** Ausdifferenziertes Blatt von *Fagus sylvatica* **(a)** Blattoberseite **(b)** Blattunterseite.....84
- Abb. 39:** Blattunterseiten von jungen Blättern von *Fagus sylvatica* **(a)** bestaubt mit Feinstaub, **(b)** bestaubt mit Mittelstaub. 25fache Vergröß-erung.....84

- Abb. 40:** Diesjähriger Spross von *Viburnum rhytidophyllum*, dichte Behaarung mit Bündelhaaren.....94
- Abb. 41:** Maximales, flächenbezogenes Feinstaubfangvermögen (PM_{2,5}) [mg/cm²] ausgewählter Spezies von diesjährigen Zweigoberflächen. Dargestellt ist der Mittelwert (n=10) mit SD, verändert nach HASENMÜLLER (2008), PAKLEPPA (2008).....94
- Abb. 42:** Diesjähriger Trieb von *Rhus typhina* **(a)** mit sehr dichter Behaarung mit Einfachhaaren, **(b)** mit Feinstaub bestaubter Trieb, 25-fache Vergrößerung, PAKLEPPA 2008.....95
- Abb. 43:** Abschlussgewebe **(a)** Periderm von *Fagus sylvatica*, **(b)** Schuppenborke bei *Platanus x hispanica*, **(c)** tiefrissige Borke bei *Quercus robur* (SITTE et al 1999).....96
- Abb. 44:** Glatte Oberflächen der Sprosse von **(a)** *Humulus lupulus* **(b)** *Bryonia dioica*; 25fache Vergrößerung PAKLEPPA 2008.....97
- Abb. 45:** Maximaler Staubauftrag [mg/cm²] verschiedener Sprossjahrgänge von *Viburnum rhytidophyllum* und *Quercus robur*. Dargestellt ist der Mittelwert (n=10) und SD, verändert nach PAKLEPPA 2008.....98
- Abb. 46:** Maximaler Staubauftrag [mg/cm²] verschiedener Sprossjahrgänge von *Corylus avellana* und *Carpinus betulus*. Dargestellt ist der Mittelwert (n=10) und SD, verändert nach PAKLEPPA 2008.....100
- Abb. 47:** Maximales, flächenbezogenes Staubfangvermögen PM_{2,5} [mg/cm²] von verschiedenen Pflanzen differenziert nach Blatt und Zweig (diesjährig).....101
- Abb. 48:** Spektrale Eigenschaften eines Pappelblattes (*Populus deltoides*) in Abhängigkeit von der Wellenlänge der auftreffenden Strahlung (GATES et al 1965).....103
- Abb. 49:** Transmissionsspektren (380-720 nm) von Blättern verschiedener Pflanzen.....103
- Abb. 50:** Transmissionsänderung durch Auflagerung von Mittelstaub (*Lycopodium*) und Feinstaub (Fimonit). Dargestellt sind Mittelwerte (n=10) und SD.....105
- Abb. 51:** Blattunterseiten von *Buddleja davidii* **(a)** bestaubt mit Mittelstaub (*Lycopodium*) **(b)** unbestaubt.....105
- Abb. 52:** Transmission [%] (Wellenlängenbereich 380-720nm) von Blättern verschiedener Spezies **(a)** bei Exposition der Blattoberseiten zur Lichtquelle (950-1000 µmol Photonen/m²s) und Bestäubung mit unterschiedlichen Staubfraktion (Mittelstaub und Feinstaub), **(b)** bei Exposition der Blattunterseiten zur Lichtquelle und Bestäubung mit unterschiedliche Staubfraktionen (Mittelstaub und Feinstaub). Dargestellt sind die Mittelwerte (n=10) und SD.....107




- Abb. 53:** Einfachhaare auf der Blattunterseite der Zierjohannisbeere (*Ribes sanguineum*), **(a)** Blattunterseite mit starker Behaarung der gesamten Blattfläche inkl. der Blattnervatur; **(b)** Blattnerf auf der Blattunterseite mit maximal anhaftendem Feinstaub; **(c)** Blattnerf auf der Blattunterseite mit maximal anhaftendem Mittelstaub.....109
- Abb. 54:** Korrelation zwischen maximaler Feinstaubauflagerung und der daraus resultierenden Reduktion der Transmission gemessen an verschiedenen Pflanzen differenziert nach Blattoberseite und Blattunterseite.....110
- Abb. 55:** Absorptionskoeffizienten (Legende: schwarz = 0 bis violett = 1) von Blattflächen von *Viburnum rhytidophyllum* **(a)-(c)** Blattoberseite und **(d)-(f)** Blattunterseite. **(a)** Kontrolloberseite, **(b)** mit Mittelstaub bestäubt, **(c)** mit Feinstaub bestäubt, **(d)** Kontrollunterseite, **(e)** mit Mittelstaub bestäubt und **(f)** mit Feinstaub bestäubt.....113
- Abb. 56:** Absorptionskoeffizienten (Legende: schwarz = 0 bis violett = 1) von Blattflächen von *Hedera helix* **(a)-(c)** Blattoberseite und **(d)-(f)** Blattunterseite. **(a)** Kontrolloberseite, **(b)** mit Mittelstaub bestäubt, **(c)** mit Feinstaub bestäubt, **(d)** Kontrollunterseite, **(e)** mit Mittelstaub bestäubt und **(f)** mit Feinstaub bestäubt.....113
- Abb. 57:** Absorptionskoeffizienten (Legende: schwarz = 0 bis violett = 1) von Blattflächen von *Sorbus intermedia* **(a)-(c)** Blattoberseite und **(d)-(f)** Blattunterseite. **(a)** Kontrolloberseite, **(b)** mit Mittelstaub bestäubt, **(c)** mit Feinstaub bestäubt, **(d)** Kontrollunterseite, **(e)** mit Mittelstaub bestäubt und **(f)** mit Feinstaub bestäubt.....115
- Abb. 58:** Absorptionskoeffizienten (Legende: schwarz = 0 bis violett = 1) von Blattflächen von *Tilia tomentosa* **(a)-(c)** Blattoberseite und **(d)-(f)** Blattunterseite. **(a)** Kontrolloberseite, **(b)** mit Mittelstaub bestäubt, **(c)** mit Feinstaub bestäubt, **(d)** Kontrollunterseite, **(e)** mit Mittelstaub bestäubt und **(f)** mit Feinstaub bestäubt.....116
- Abb. 59:** Blattunterseiten von *Tilia tomentosa* **(a)** dichte Behaarung mit Schildhaaren **(b)** bestäubt mit Feinstaub.....117
- Abb. 60:** Blattunterseiten von *Sorbus intermedia* **(a)** dichte Behaarung mit Einfachhaaren, **(b)** mit Mittelstaub bestäubt.....121
- Abb. 61:** Elektronentransportraten [ETR] bei steigender Lichtintensität (Lichtkurven) von Blättern von *Sorbus intermedia*. **(a)** Blattoberseiten (adaxial) bestäubt mit Mittelstaub und unbestäubter Kontrolle, **(b)** Blattunterseiten (abaxial) bestäubt mit Mittelstaub. Dargestellt sind Mittelwerte (n=8) mit SD mit Trendlinie und Regressionskoeffizient. Die Unterschiede der ETR zwischen unbestäubter Kontrolle und mit Mittelstaub bestäubter Oberfläche sind höchst signifikant (***)122

- Abb. 62:** Elektronentransportraten [ETR] bei steigender Lichtintensität (Lichtkurven) von Blättern von *Tilia tomentosa*. (a) Blattoberseiten (adaxial) bestäubt mit Mittelstaub und unbestäubter Kontrolle, (b) Blattunterseiten (abaxial) bestäubt mit Mittelstaub. Dargestellt sind Mittelwerte (n=8) mit SD, Trendlinie und Regressionskoeffizient. Die Unterschiede der ETR zwischen unbestäubter Kontrolle und mit Mittelstaub bestäubter Oberfläche sind höchst signifikant (***).....124
- Abb. 63:** Elektronentransportraten [ETR] bei steigender Lichtintensität (Lichtkurven) von Blättern von *Dracaena marginata*. (a) Blattoberseiten (adaxial) bestäubt mit Mittelstaub und unbestäubter Kontrolle, (b) Blattunterseiten (abaxial) bestäubt mit Mittelstaub. Dargestellt sind Mittelwerte (n=8) mit SD, Trendlinie und Regressionskoeffizient. Die Unterschiede der ETR zwischen unbestäubter Kontrolle und mit Mittelstaub bestäubter Oberfläche sind nicht signifikant (ns).....125
- Abb. 64:** Blattoberseite von *Dracaena marginata* (a) Kontrolle unbestäubt mit Stomata (b) bestäubt mit Mittelstaub126
- Abb. 65:** Elektronentransportraten [ETR] bei steigender Lichtintensität (Lichtkurven) von Blättern von *Ficus benjamini*. (a) Blattoberseiten (adaxial) bestäubt mit Mittelstaub und unbestäubter Kontrolle, (b) Blattunterseiten (abaxial) bestäubt mit Mittelstaub. Dargestellt sind Mittelwerte (n=8) mit SD, Trendlinie und Regressionskoeffizient. Die Unterschiede der ETR zwischen unbestäubter Kontrolle und mit Mittelstaub bestäubter Oberfläche sind nicht signifikant (ns)..... 127
- Abb. 66:** Blattunterseiten von *Quercus rubra* (a) Blattnerv und Interkostalfelder (b) Blattnerv und Interkostalfelder mit Feinstaub bestäubt.....128
- Abb. 67:** Elektronentransportraten (ETR) von Blättern verschiedener Pflanzenarten nach Bestäubung mit verschiedenen Stäuben (Feinstaub und Mittelstaub) und unbestäubten Kontrollen unterschieden nach (a) Blattoberseite und (b) Blattunterseite. Dargestellt sind Mittelwerte (n=6) mit SD. Die Unterschiede der ETR zwischen unbestäubten Kontrollblättern und den jeweiligen Stäuben sind höchst signifikant (***), hoch signifikant (**), signifikant (*) und nicht signifikant (ns). Gemessen wurde bei einer Lichtintensität von 366 PAR [$\mu\text{mol Photonen/m}^2\text{s}$].....130
- Abb. 68:** Staubauftrag bei verschiedenen Spezies in Abhängigkeit ihrer Behaarung. Dargestellt ist der Signifikanzgrad zwischen den Pflanzenarten in Anlehnung an die Sternsymbolik von SACHS(1995)134
- Abb. 69 :** Tagesgang der Temperatur bei verschiedenen Beständen direkt über dem Boden (in 1 cm Höhe) an einem sonnigen Tag (PFANZ et al 2006)..141
- Abb. 70:** Verschiedene Austauschszenarien von Luftmassen bei unterschiedlichen Bepflanzungen. Links: dichtkronige Allee, recht: Fassadenbegrünung (BRUSE, 2003).....143

6.3 Tabellenverzeichnis

Tab. 1:	Windgeschwindigkeiten in der Wirbelschleppe vorbeifahrender Kraftfahrzeuge. Die Messungen wurden direkt am Straßenrand in verschiedenen Höhen über Grund durchgeführt (PFANZ et al. 2006).....	5
Tab. 2:	Internationale Grenzwerte PM ₁₀ , PM _{2,5} und WHO Richtgrenzwert (Zusammenstellung nach BAFU 2006; RICHTLINIE 2008/50/EG; WHO 2004,2005).....	10
Tab. 3:	Korngrößenbasierte Einteilung von Staubfraktionen nach LAHMANN 1990.....	15
Tab. 4:	Korngrößenverteilung in Deutschland PETERS et al 1998.....	15
Tab. 5:	Abscheidemechanismen verschiedener Partikel aus der Atmosphäre verändert nach CHAMBERLAIN & LITTLE 1981.....	17
Tab. 6:	Chemische Analyse (Masse %) Fimonit (Datenblatt FIM Biotech GmbH)	23
Tab. 7:	Korngrößenverteilung Schlämmanalyse (DIN 18123), Datenblatt FIM Biotech GmbH.....	24
Tab. 8:	Gravimetrisch bestimmter Wasserverlust der Blätter (n=10) von <i>Ficus benjamini</i>	29
Tab. 9:	Massenkonzentrationen und gemessene Mittelwerte und SD der Transmission [%] der Eichkurve.....	31
Tab. 10:	Sedimentationsgeschwindigkeit für 10 cm Sinkstrecke in Wasser bei 20°C (HARTGE 1999).....	31
Tab. 11:	Vergleichende Ergebnisse zwischen Imaging-PAM und Teaching-PAM. Es wurden je 6 unbestaubte und 6 bestaubte Blattproben vermessen, jeweils die Blattoberseite (oben), n=6 und Blattunterseite (unten), n=6. Dargestellt ist der Einfluss der Staubauflagerung auf die Elektronentransportrate [ETR], errechnet mit ETR unbestaubt – ETR bestaubt + = ETR steigt; - = ETR sinkt; 0= keinen Einfluss.....	41
Tab. 12:	Das maximale, flächenbezogene Mittelstaubfangvermögen [mg/cm ²] von Blättern (Blattober- und -unterseite) diverser Pflanzenspezies. Dargestellt ist der Mittelwert (n=25) mit Standardabweichung (SD) sortiert nach dem <u>maximalen Mittelstaubfangvermögen</u> mit Angaben zur Behaarung.....	46
Tab. 13:	Haartypen verschiedener Pflanzen verändert nach WESTERKAMP & DEMMELMEYER 1997 OS (Blattoberseite), US (Blattunterseite).....	53/54

- Tab. 14:** Das maximale, flächenbezogene Staubfangvermögen (PM10 und PM2,5) [mg/cm²] von Blättern (Blattober- und -unterseite) diverser Pflanzenspezies. Dargestellt ist der Mittelwert (n=25) mit Standardabweichung (SD) alphabetisch nach dem maximalen Mittelstaub-Fangvermögen sortiert mit Angaben zur Behaarung.....57-59
- Tab. 15:** Das maximale, flächenbezogene Staubfangvermögen (Mittelstaub, PM10 und PM2,5) [mg/cm²] von Blättern differenziert nach Blattober- und -unterseite diverser Pflanzenspezies. Dargestellt ist der Mittelwert (n=25) und SD sowie der prozentuale Anteil des Gesamtstaubes auf der jeweiligen Blattseite.....77
- Tab. 16:** Auflistung des maximalen Staubfangvermögens [mg/cm²] von Feinstaub (PM10 und PM2,5) auf Blättern diverser Pflanzenspezies. Dargestellt ist der Mittelwert (n=25) mit Standardabweichung (SD) absteigend nach dem maximalen Staubbindevermögen sortiert mit systematischer Einbindung.....87/88
- Tab. 17:** Das maximale, flächenbezogene Feinstaubfangvermögen (PM10 und PM2,5) [mg/cm²] von Blättern diverser Pflanzenspezies. Dargestellt ist der Mittelwert (n=25) mit Standardabweichung (SD) sortiert unterteilt nach Pflanzentyp, alphabetisch nach dem maximalen Feinstaubfangvermögen.....89-91
- Tab. 18:** Das maximale, flächenbezogene Feinstaubfangvermögen (PM10 und PM2,5) [mg/cm²] von Blättern diverser Zimmerpflanzen. Dargestellt ist der Mittelwert (n=25) mit Standardabweichung (SD) alphabetisch nach dem maximalen Feinstaubfangvermögen sortiert.....92
- Tab. 19:** Maximales, flächenbezogenes Staubfangvermögen [mg/cm²] von Zweigen verschiedenen Jahrgängen ausgesuchter Spezies, verändert nach HASENMÜLLER 2008, PAKLEPPA 2008.....99
- Tab. 20:** Reduktion der Blatttransmission [%] verschiedener Spezies bei maximaler Auflagerung von Mittel- bzw. Feinstaub im Vergleich zur Kontrolle und der Exposition des Blattes zur Lichtquelle. Dargestellt ist der Signifikanzgrad von Kontrolle und Staubvariante in Anlehnung an die Sternsymbolik von SACHS (1995). Die Unterschiede der Reduktion der Blatttransmission zwischen unbestaubter Kontrolle und den jeweiligen Stäuben versetzten Blättern sind höchst signifikant (***), hoch signifikant (**), signifikant (*) und nicht signifikant (ns).....108
- Tab. 21:** Absorptionskoeffizienten von Blattflächen (Blattoberseite) ausgewählter Pflanzenarten bei maximaler, speziesspezifischer Auflagerung von Mittel- bzw. Feinstaub im Vergleich zur Kontrolle. Dargestellt sind Mittelwerte (n=6) und die Reduktion der Absorption in % durch Staubauflagerungen. Die Unterschiede der Reduktion der Absorptionskoeffizienten zwischen unbestaubter Kontrolle und den jeweiligen Stäuben versetzten Blättern sind höchst signifikant (***), hoch signifikant (**), signifikant (*) und nicht signifikant (ns).....118

- Tab. 22:** Absorptionskoeffizienten von Blattflächen (Blattunterseite) ausgewählter Pflanzenarten bei maximaler Auflagerung von Mittel- bzw. Feinstaub im Vergleich zur Kontrolle. Dargestellt sind Mittelwerte (n=6) und die Reduktion der Absorption in % durch Staubauflagerungen. Die Unterschiede der Reduktion der Absorptionskoeffizienten zwischen unbestaubter Kontrolle und den jeweiligen Stäuben versetzten Blättern sind höchst signifikant (***), hoch signifikant (**), signifikant (*) und nicht signifikant (ns).....119
- Tab. 23:** Auflistung aller untersuchten Pflanzenarten mit Angaben zum Staubfangvermögen von Feinstaub (PM10) und (PM2,5) (n=25) in mg bezogen auf die Blattfläche [cm²] mit Standardabweichung [SD] mit Angaben zur Behaarung. Die farbig gehaltene Spalte „Haare“ teilt alle untersuchten Arten nach ihrer Behaarung ein, dabei entspricht  einer dichten Behaarung, die in den meisten Fällen auf der Blattunterseite dichter als auf der Blattoberseite ist,  entspricht einer lockeren Behaarung,  keine nennenswerte Behaarung, höchstens wenige einzelne Haare.....135-137

6.4 Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen recht herzlich bedanken, die mich während der Arbeit und Forschungszeit begleitet und mich bei der Fertigstellung dieser Arbeit unterstützt haben:

Herrn Prof. Dr. Hardy Pfanzen danke ich für die Möglichkeit an diesem interessanten Thema arbeiten zu können und für anregende „staubige“ Diskussionen.

Frau Dr. Christiane Wittmann unterstützte mich voller Engagement und viel Humor während Höhen und Tiefen auf fachlicher und menschlicher Ebene. Für diese sehr freundschaftliche und kollegiale Begleitung sei ihr an dieser Stelle aufs herzlichste gedankt.

Frau Dr. Janne Mombour danke ich für ihre Unterstützung, den vielen anregenden Gesprächen fachlicher als auch privater Natur und der sehr angenehmen und humorvollen Atmosphäre in unserem gemeinsamen Büro.

Der gesamten Arbeitsgruppe der Angewandten Botanik sei für die sehr herzliche und kollegiale Atmosphäre, Zusammenarbeit und der Unterstützung in vielfältiger Weise gedankt.

Christa Kosch möchte ich zudem für ihre Unterstützung im Labor herzlich danken.

Meinen Eltern danke ich für ihre immerwährende Unterstützung, ihre Liebe und ihren Glauben an mich!

Stefan Keller danke ich für seine Hilfsbereitschaft und stete Lösung von Problemen rund um den PC, der Durchsicht des Manuskripts und seine Unterstützung in vielerlei Form.

Frau Dipl.-Umweltwiss. Carmen Nickel danke ich für das Korrekturlesen der Doktorarbeit und hilfreiche Hinweise.

Der Firma Fim Biotech GmbH danke ich für die freundliche Bereitstellung von Fimonitproben.

Für die erhaltenen Grassamen sei der Deutschen Saatveredelung AG / Euro Grass B.V. herzlich gedankt.

6.5**Lebenslauf**

Der Lebenslauf ist in der Online-Version aus Gründen des Datenschutzes nicht enthalten.